HAL
open science

La recherche à l'IGN : activités 2003

P. Bueso, D Boldo, Christian Thom, Anne Ruas, Olivier Jamet, Gilles Martinoty, Nicolas Paparoditis, Ouided Bentrah, Matthieu Deveau, Olivier Tournaire, et al.

To cite this version:

P. Bueso, D Boldo, Christian Thom, Anne Ruas, Olivier Jamet, et al.. La recherche à l'IGN : activités 2003. Bulletin d'information de l'IGN N°75. 2006. hal-02372841

HAL Id: hal-02372841

https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372841

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 2003

La recherche en 2003

01 Classement IGN-SR : **06-001/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-MANDÉ CEDEX

04 Rédacteur en chef
Patrice Bueso
IGN, Direction Technique, Service de la Recherche
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT-MANDÉ CEDEX

05 Réalisé au Service de la Recherche de l'IGN
Institut Géographique National
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT-MANDÉ CEDEX
http://recherche.ign.fr

06 Titre *: La recherche en 2003*

07 Date d'édition : 2006/1

13 Numéro 75

15 Nom de la collection : *Bulletin d'information scientifique & technique de l'IGN*

En couverture

Carte des anomalies de la pesanteur à la surface du globe, calculées à partir du modèle de champ EGM96. Seuls les degrés d'harmoniques sphériques inférieurs à 12 sont considérés (résolution spatiale de 1700 km). Ce modèle est basé sur l'analyse de données satellitaires (perturbations d'orbites, altimétrie en mer) et de mesures faites au sol. L'échelle est donnée en milligals (la pesanteur moyenne terrestre, égale à 9,8 $m.s^{-2}$ environ, vaut 980000 m Gals). Ces anomalies reflètent l'écart entre la Terre réelle et une Terre modèle, ellipsoïdale et homogène. Les points noirs représentent un échantillonnage du modèle EGM96 utilisé pour calculer une représentation en ondelettes sphériques du champ.

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-MANDÉ CEDEX
isabelle.melot@ign.fr

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

Table des matières

A. Bilan 1

A.1 La recherche à l'IGN (*P. Bueso*) 1

A.2 Les travaux du laboratoire MATIS (*D. Boldo*) 3

A.3 Les travaux du laboratoire OEMI (*Ch. Thom*) 4

A.4 Les travaux du laboratoire COGIT (*A. Ruas*) 6

A.5 Les travaux du laboratoire LAREG (*O. Jamet*) 9

B. Quelques actions marquantes 11

B.1 Effets radiométriques en milieu urbain à grande échelle et correction des ombres (*G. Martinoty*) 11

B.2 Modélisation 3D automatique terrestre d'environnements urbains et complexes, à très grande échelle (*N. Paparoditis, O. Bentrah, M. Deveau & L. Penard*) 21

B.3 Détection et reconstruction de facettes 3D par approche hiérarchique par régions, à partir de couples d'images satellite THR (*N. Chehata*) 29

B.4 Segmentation multi-échelles d'images et applications (*L. Guigues, Roger Trias-Sanz, Nesrine Chehata, Franck Taillandier & Matthieu Deveau*) 41

B.5 Mesure de la déviation de la verticale par des observations astronomiques (*O. Martin*) 59

B.6 Étude de la cohérence inter-représentations, vers une meilleure intégration des bases de données spatiales (*D. Sheeren*) 71

B.7 Formalisation des spécifications des bases de données géographiques (*N. Gesbert*) 81

B.8 Analyse d'évolutions topographiques élémentaires pour le suivi de phénomènes géographiques (*P. Bordin*) 87

B.9 Caractérisation de zones d'erreurs récurrentes sur plusieurs types de MNT (*F. Rousseaux*) 95

B.10 Outils et méthodes de généralisation du bâti pour la fabrication des cartes au 1 : 25 000 et au 1 : 50 000 (*J. Trévisan*) 101

B.11 Représentation du champ de pesanteur sur des repères d'ondelettes sphériques (*I. Panet, O. Jamet & M. Diament*) 115

B.12 Évaluation de la qualité des séries temporelles de mesures en géodésie spatiale (*K. Le Bail*) 123

B.13 Effet de moyenne par moindres carrés, application à l'analyse des séries temporelles laser (*D. Coulot & P. Berio*) 133

C. Publications 147

Thèses de doctorat 147

Rapports de mi-thèse (doctorat) 148

Articles (journaux scientifiques) 148

Articles parus dans ce bulletin 149

Communications à congrès 150

Rapports de stage 154

Rapports internes & comptes rendus 155

A.1 La recherche à l'IGN

Patrice Bueso, chef du Service de la Recherche

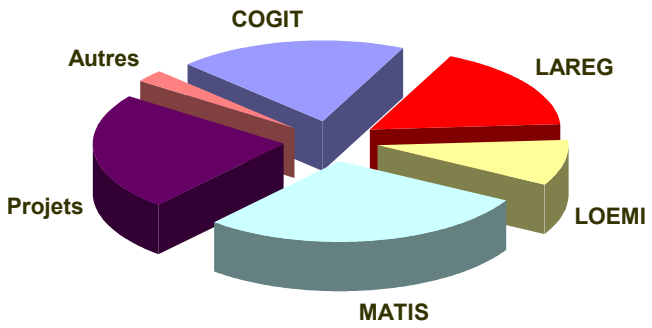
Ce bulletin d'information, qui porte le numéro 75, dresse le bilan des activités menées en 2003 par l'Institut géograhique national dans le cadre de sa mission de recherche scientifique dans le domaine de l'information géographique et livre une série d'articles scientifiques rédigés par des chercheurs des laboratoires de l'IGN. Ces articles font écho aux treizièmes journées de la Recherche qui se sont tenues les 10 et 11 mars 2004 dans les locaux de l'Ecole nationale des sciences géographiques à Marne-la-Vallée[1].

En 2003 …

Année de continuité sur le plan des travaux scientifiques, travaux inscrits dans le schéma directeur de la recherche et des développements 2000-2005, 2003 a vu la signature en septembre du contrat d'objectifs et de moyens pour la période 2003 à 2006 entre l'Etat et l'IGN, contrat qui conforte la mission scientifique de l'IGN au bénéfice de l'établissement et, plus largement, au bénéfice de la collectivité nationale et internationale. Ce texte souligne en particulier l'atout que représente pour l'IGN l'existence de cette capacité en recherche sur des thématiques en relation avec les activités de production et de diffusion de l'établissement et sur l'utilisation de l'information géographique.

Sans remettre en cause les options scientifiques du schéma directeur, le contrat d'objectif et de moyens insiste néanmoins sur l'amélioration nécessaire de la visibilité et la valorisation de la recherche menée à l'IGN. Citons, entre autres, la constitution ou la consolidation de réseaux nationaux et internationaux autour de la recherche en information géographique, la participation accrue de l'IGN au 6ème PCRD, la diversification de l'origine des chercheurs, le meilleur accès pour des chercheurs extérieurs aux données produites par l'IGN, l'augmentation du nombre de publications scientifiques, etc. Au-delà de la production de connaissances scientifiques, la mission principale de l'activité de recherche reste la préparation d'outils pour le futur : parmi les pistes mises en avant on trouve l'accès aux données par le langage naturel, la constitution de modèles urbains 3D, une contribution à la modélisation des risques naturels et industriels ...

En 2003, les effectifs de la recherche (57 personnes) ont été globalement stables par rapport à l'année précédente, un peu en dessous des prévisions du schéma directeur de la recherche et du développement (qui prévoit pour cette activité un effectif de soixante personnes environ). A noter un renouvellement important de l'encadrement scientifique avec la nomination de Marc Pierrot Deseilligny comme directeur technique adjoint de l'IGN, en charge de la recherche (en remplacement d'Hervé Le Men) et l'arrivée d'Olivier Jamet et Didier Boldo à la tête du LAREG et du MATIS respectivement.



Effectif respectif des laboratoires et des projets du service de la Recherche : sur un total de 80 personnes travaillant dans le service, 57 sont affectées dans les laboratoires de recherche.

Dans le domaine académique, quatre thèses de doctorat ont été soutenues en 2003 dans les laboratoires de l'IGN :

Fabien RAMOS *COGIT*	5 mai 2003	Modélisation et validation d'un Système d'information géographique 3D opérationnel *Thèse de l'université de Marne-la-Vallée dirigée par Bernard Cervelle* *Encadrement scientifique à l'IGN : Anne Ruas*
Frédéric HUBERT *COGIT*	7 juillet 2003	Modèle de traduction des besoins d'un utilisateur pour la dérivation de données géographiques et leur symbolisation par le web *Thèse de l'université de Caen dirigée par Anne Nicole* *Encadrement scientifique à l'IGN : Anne Ruas*

[1] Toutes les conférences de ces journées ont fait l'objet d'un article long dans ce numéro excepté l'exposé de Marc Pierrot Deseilligny sur l'autocalibration des caméras numériques de l'IGN et la présentation du projet Carto 2001 par François Lecordix.

Laurent GUIGUES *MATIS*	12 décembre 2003	Modèles multi-échelles pour la segmentation d'images *Thèse de l'université de Cergy-Pontoise dirigée par Jean-Pierre Coquerez, co-dirigée et encadrée à l'IGN par Hervé Le Men*
Muhammad Ali SAMMUNEH *LAREG*	15 décembre 2003	Contribution au positionnement en temps réel par GPS – prédiction de la correction ionosphérique *Thèse de l'Observatoire de Paris dirigée et encadrée à l'IGN par Martine Feissel-Vernier*

Cette recherche au caractère finalisé marqué est menée dans quatre laboratoires en fonction des thématiques explorées :

- le COGIT (Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique) pour les systèmes d'information géographique et la cartographie
- le LAREG (Laboratoire de Recherche en Géodésie) pour la géodésie
- le LOEMI (Laboratoire d'Optique, d'Electronique et de Micro-Informatique) pour les capteurs et instruments de mesure
- le MATIS (Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Images pour la Stéréorestitution) pour la photogrammétrie et l'analyse d'image.

L'activité de ces laboratoires est succinctement décrite dans les pages qui suivent. Le numéro 76 du bulletin d'information sera entièrement consacré au bilan d'activité des laboratoires ainsi qu'au prochain schéma directeur de la recherche et des développements.

Valorisation des travaux de recherche en 2003

Les axes de valorisation (en plus des publications dont on trouvera une liste en fin de volume et des participations à congrès) sont principalement au nombre de trois :

- au niveau national, les activités d'expertise et d'assistance à maîtrise d'ouvrage essentiellement en photogrammétrie et analyse d'image au profit de la Défense ainsi que la poursuite de la collaboration autour des caméras numériques avec le CNES et l'ONERA ;
- sur le plan européen, la participation renouvelée en 2003 à deux projets européens du 5ème PCRD : V-PLANET[2] (IST-2000-28095) qui concerne le développement d'un explorateur de données géographiques tridimensionnelles haute résolution et SPIRIT[3] (IST-2001-35047) qui porte lui sur un moteur de recherche de documents ou de données sur l'internet, spécialisé dans les requêtes sur des critères spatialisés ;
- et en interne, des projets de développement

Le service de la Recherche, maître d'œuvre des travaux de recherche, abrite en effet des projets de développement qui ont pour fonction le transfert des résultats de la recherche vers les unités de production. Une vingtaine d'ingénieurs sont affectés à ces cinq projets : le projet Caméra Numérique, Carto 2001, Diffusion des données numériques sur le réseau, Unification des Bases de Données, RGE Alti.

Ce dernier projet a débuté en octobre 2003, avec l'objectif global de répondre au besoin de l'IGN d'améliorer localement et par des méthodes appropriées la qualité de la couche altimétrique du Référentiel à Grande Échelle. Quant au projet Caméra Numérique (à ne pas confondre avec l'activité principale du laboratoire OEMI de développement de caméras numériques), lancé en mai 2000 avec pour objectifs l'industrialisation de la production et de la gestion de l'imagerie numérique (issue des caméras numériques de l'IGN ou du scannage de clichés argentiques), il s'est achevé début 2003.

En 2003, des avancées notables ont été observées :

- le projet Carto 2001 dont l'objectif est l'automatisation du processus de réalisation de cartes au 1:100.000 produites à partir de la BD CARTO®, a finalisé les outils prototype de généralisation et de placement des écritures et la mise au point de l'intégration des lots d'évolution nécessaires pour la mise à jour automatique.
- le projet Diffusion des données numériques sur le réseau qui se propose d'automatiser le processus d'archivage et de diffusion à l'IGN afin d'obtenir une augmentation du flux de diffusion et une meilleure utilisation des données numériques archivées et sauvegardées, a travaillé entre autres en 2003 au développement à partir du prototype de recherche du COGIT d'un logiciel de comparaison de bases de données en vue de l'identification et la diffusion des changements – ce logiciel génère les lots d'évolution utilisés par les outils du projet Carto 2001.
- le projet Unification des bases de données enfin vise à fournir les outils au sens large d'unification des bases de données vectorielles de l'IGN (en se limitant à la grande échelle dans un premier temps puis en intégrant des échelles plus petites) ainsi que ceux permettant de gérer une fois constituée la base unifiée en particulier sur des aspects de mise à jour. En 2003 : signalons la réalisation d'un outil performant d'unification des thèmes routiers aux grandes échelles utilisant une interface graphique dédiée.

[2] The Virtual Planet : http://www.cordis.lu/ist/ka3/iaf/projects/vplanet.htm
[3] Spatially-Aware Information Retrieval on the Internet : http://www.geo-spirit.org/

A.2 Les travaux du laboratoire MATIS

Didier Boldo (responsable du thème Image & photogrammétrie)

Quatre thèses ont débuté au MATIS, deux en particulier dans l'action de recherche *ARCHI – Photogrammétrie Terrestre et Architecturale* dont 2003 a marqué la montée en puissance (l'effectif nominal de quatre personnes a été atteint). On peut signaler dans cette action, les premières expériences avec un véhicule instrumenté *Stéréopolis* permettant l'acquisition de prises de vue urbaines terrestres stéréoscopiques et géoréférencées pour des applications à très grande échelle (voir sur ce sujet l'article de Nicolas Paparoditis en p. 21 de ce volume). L'action de recherche duale *BRIGE – Reconstruction du bâti pour la cartographie grande échelle* sur la restitution automatique du bâti à partir d'imagerie aérienne ou spatiale à haute résolution en vue de la constitution de bases de données urbaines est elle entrée dans un phase de maturité ; la maquette de production de données 3D (BATI 3D) devient opérationnelle avec comme avancée majeure en 2003 le développement d'outils interactifs d'édition. Enfin, les résultats prometteurs des travaux sur la segmentation trouvent sans attendre des applications industrielles dans les productions de l'IGN, en particulier pour la détection automatique de la végétation dans les photographies aériennes.

Quant aux autre actions, *EVAL – Données de référence et outils d'évaluation en imagerie 3D* n'a jamais réellement atteint une taille à la hauteur de ses objectifs initiaux et reste réduite à la création et à l'entretien d'un site internet de diffusion de données permettant à la communauté scientifique de tester ses algorithmes sur un même jeu test. En fonction du succès rencontré par ce site, le laboratoire redonnera sa pleine dimension à la composante évaluation. Eloignée de ses objectifs initiaux, l'action *DCHAN – Détection de changements pour la mise à jour de données topographiques* effectue des travaux très en amont sur la stéréoscopie multi-vue et la qualification de primitives 3D d'une part et l'utilisation de modèles déformables pour la comparaison de modèle de surfaces d'autre part. En dehors de quelques stages, il n'y a pas de travaux orientés détection de changement travaillant sur la texture ou la radiométrie, les expériences passées (surtout en dehors de l'IGN) ayant montré la grande difficulté de ces problèmes. Avec le recul, l'analyse du MATIS est que ces problèmes de détection de changement sont des problèmes si complexes qu'ils doivent être abordés soit de manière très amont en attaquant les problèmes fondamentaux qu'ils soulèvent soit au contraire de manière très pragmatique en réponse à un besoin précis de la production et en s'orientant vers des solutions interactives qui esquivent systématiquement les points durs. L'action *CARIM – Lecture couplée Carte / Image* malgré ses résultats est en voie de disparition suite au départ après sa thèse de Laurent Guigues et l'investissement croissant de Jean-Marc Viglino dans des actions de valorisation (projets BD Parcellaire et Vectorisation de la BD Parcellaire). Patrick Julien poursuit quant à lui ses travaux sur les MNT et MNE au sein de l'action *COSMO – Corrélation multi-stéréoscopique et modélisation numérique de surface*.

L'année 2003 est une année de relative stabilité concernant les actions de recherche du laboratoire, il n'y a eu ni apparition ni disparition et toutes ont à peu près conservé le même poids relatif. Une innovation de l'année 2003 réside dans la participation croisée dans plusieurs actions de recherche de chercheurs ou d'ingénieurs du MATIS et du LOEMI à des actions de l'autre laboratoire (participation de Jean-Pierre Bignon à l'action ARCHI pour la conception des mâts support de caméra, participation de Marc Pierrot Deseilligny à l'action CAMNU pour la calibration fine des composantes non radiale de la distorsion).

En prévision de départs programmés, le laboratoire a maintenu un bon niveau de recrutement puisque quatre thèses ont donc débuté en 2003 (sept thèses de doctorat sont par ailleurs en cours au laboratoire) :

- la thèse de Matthieu Deveau encadrée par Nicolas Paparoditis et Marc Pierrot Deseilligny, en collaboration avec EDF et la société MENSI sur l'utilisation conjointe de relevés laser terrestre et de photographies pour l'automatisation de l'extraction de primitive 3D ;
- la thèse de Laurence Boudet encadrée par Franck Jung et Nicolas Paparoditis sur la caractérisation de la fiabilité de primitives 3D extraites en multi-stéréoscopie (financement DGA) ;
- la thèse d'Olivier Tournaire encadrée par Franck Jung, Nicolas Paparoditis et Bernard Cervelle sur l'utilisation d'images aériennes très haute résolution pour de l'interprétation de scènes urbaine – mobilier urbain, trottoirs, chaussées, etc. (financement MRT) ;
- la thèse de Lionel Pénard autour de l'utilisation conjointe de prises de vues aériennes et terrestres pour la restitution architecturale (sujet en cours de définition) ;

Le laboratoire continue dans le même temps ses collaborations externes dans le cadre de co-encadrement de thèses avec le CNES, l'université Paris 5 René Descartes, l'ONERA, l'université de Marne-la-Vallée, l'INRIA Rhône-Alpes ou dans le cadre d'études comme avec le laboratoire ETIS (séparation sol / sursol à partir de modèles numériques d'élévation). En 2003, un certain nombre d'études ont été menées dans le domaine de l'expertise en imagerie pour le compte de la DGA.

En interne, les collaborations se font essentiellement avec les services de production autour de la mise en production de la BD Parcellaire et de sa vectorisation, de l'amélioration de la détection de la végétation sur de l'orthophotographie par l'introduction de nouvelles méthodes de segmentation, autour de l'utilisation de la maquette BATI 3D pour la mise en 3D automatique de bases de données 2D (tests sur la Communauté Urbaine de Bordeaux). Avec le LOEMI, la collaboration est scientifique et porte sur les méthodes de calibration fine de la caméra numérique et l'intégration des modèles fournis par ces méthodes dans le logiciel DICA au profit du service des Bases de données Images et du service des Activités Aériennes (en cours).

A.3 Les travaux du Laboratoire OEMI

Christian Thom (responsable du thème Instrumentation)

Les recherches menées au LOEMI se ventilent traditionnellement sur deux grands domaines d'activité de l'IGN : la photogrammétrie, avec la réalisation d'une caméra numérique de prise de vue aérienne et la métrologie avec plusieurs activités, dont le but final est de permettre d'utiliser le GPS pour faire du nivellement précis, en améliorant la mesure elle-même et en travaillant à l'amélioration de la grille de passage des altitudes GPS aux altitudes physiques.

Photogrammétrie

L'acquisition d'images directement numériques est en synergie complète avec l'évolution générale de la production à l'IGN. Le passage au tout numérique est rendu nécessaire par l'urgence de la réalisation, puis de la mise à jour des bases de données géographiques et donc de la mise au point de méthodes d'aide automatique à la restitution. L'arrivée annoncée d'images satellitales de résolution métrique devrait encore accélérer les besoins en imagerie numérique aéroportée, en l'orientant vers une résolution plus grande encore.

Amélioration et exploitation des caméras numériques

Les caméras numériques conçues et réalisées par le LOEMI (voir BI n° 74, p. 53) sont maintenant utilisées en production : en 2003, l'Ile-de-France et trois autres départements ont fait l'objet d'une prise de vues départementale avec succès. Toutefois, certains problèmes de maintenance matérielle et logicielle restent à régler. La fiabilisation des caméras s'est poursuivie, grâce au rapport des incidents de vol par les équipages. Une étude a été menée pour analyser les différentes procédures de maintenance et les simplifier si possible : cela a par exemple concerné l'échange standard de racks de sauvegarde, en cas de panne de l'un d'eux.

Étalonnage

L'instrument équipé d'objectifs de focale 28 mm nous a amenés à nous pencher sur l'amélioration et l'automatisation partielle des techniques d'étalonnage géométrique : le problème est toujours à l'étude, au LOEMI pour des solutions instrumentales et au laboratoire MATIS pour la partie logicielle. Cette dernière a bien avancé grâce aux travaux de Marc Pierrot Deseilligny et la modélisation de la distorsion par des grilles est passée en production. Des méthodes existent maintenant pour avoir une estimation dense de la distorsion par autocalibration. L'utilisation conjointe du polygone de calibration permet alors une très bonne calibration géométrique des caméras. Pour la partie instrumentale, qui comprend la réalisation d'une plate-forme orientable équipée de capteurs angulaires très précis, le travail s'est limité à l'approvisionnement de sous-ensembles électromécaniques. Cet équipement permettrait l'étalonnage direct de la géométrie et de la FTM des caméras. L'amélioration de notre processus d'étalonnage radiométrique par l'acquisition de nouvelles lampes pour la sphère intégrante n'a pas donné entière satisfaction, notamment pour les courtes focales dans le canal rouge. En ce qui concerne l'élimination des voiles parasites, divers traitements des pièces mécaniques intervenant dans le montage des objectifs ont été essayés, sans grand succès. D'autres pistes sont en cours d'examen.

Évolution

Le laboratoire travaille sur la gestion centralisée sur PC des caméras et sur l'évolution de la plate-forme stabilisée de sa version analogique actuelle vers une version numérique. La réflexion sur la conception d'une nouvelle version de caméra basée sur des technologies plus récentes s'est poursuivie. Des contact ont été pris à l'extérieur pour la réalisation d'une carte d'interface directe entre le calculateur et la caméra. Différentes solutions sont encore à l'étude, qui incluent le passage à une interface série rapide proche de la notre, le "*Camera Link*". Il restera à réécrire les logiciels de gestion du système sous un OS ayant un comportement temps réel convenable. En parallèle à ces travaux, un soutien a été apporté aux opérateurs du SAA (Service des Activités Aériennes) en ce qui concerne l'utilisation, la maintenance et éventuellement le dépannage des systèmes utilisés en production, ainsi que dans les phases de post-traitement des images.

Métrologie – positionnement

Altimétrie par GPS

Jérôme Tarniewicz, dont l'étude du sondage par LIDAR de la vapeur d'eau dans la troposphère pour des corrections de mesures GPS était le sujet de thèse n'étant plus directement impliqué dans le projet depuis fin 2002, l'activité LIDAR s'est trouvée ralentie. Certaines améliorations de l'instrumentation ont pourtant été réalisées, permettant la mesure de profils de rapport de mélange vapeur d'eau / azote dans la direction des satellites GPS, avec mesure simultanée des données GPS. Le traitement s'est poursuivi en 2004 où on a étudié son application à l'amélioration des mesures GPS. Un protocole de collaboration avec le Service d'Aéronomie, faisant suite au changement de statut du responsable de la recherche Olivier Bock a été établi.

Photo-théodolite astronomique

Cette action de recherche, commencée fin 2002, a pour but d'exploiter les possibilités de positionnement et de datation du GPS couplées aux capacités de pointé et de mesure de la verticale d'un théodolite motorisé pour évaluer la déviation de la verticale par un procédé entièrement automatique (voir sur ce sujet l'article d'Olivier Martin en p. 59 de ce volume). Ceci permettra de parfaire la fameuse grille de correction altimétrique (permettant de passer des altitudes GPS aux altitudes mesurées par nivellement). En 2003, le système a été réalisé et deux soirées de mesures réalisées. Le traitement des données, réalisé par le Service de Géodésie et de Nivellement de l'IGN, est en voie de finalisation.

Modernisation de la station laser ultra-mobile

Les travaux sur cette action de recherche ont été relativement faibles en 2003. La cause en a été les difficultés d'approvisionnement des composants mécaniques et électromécaniques. Cette action de recherche a cependant indirectement bénéficié des résultats de l'action de recherche consacrée à l'astro-théodolite, avec laquelle elle a certains aspects communs : pointé d'étoiles, gestion de catalogues d'étoiles, gestion d'instruments externes depuis un PC, problèmes de synchronisation, connexion avec un GPS, etc.

A.4 Les travaux du laboratoire COGIT

Anne Ruas (responsable du thème Information géographique & cartographie)

Les actions de recherche du laboratoire ont fait en 2003 l'objet d'une restructuration autour de trois thèmes : l'aide à l'accès et à la consultation de données et de traitements géographiques, la gestion et la représentation des bases de données géographiques, l'analyse de données pour des applications liées au risque et à l'aménagement.

On notera en 2003 la fin de l'étude sur la représentation des données BD TOPO® Pays pour la réalisation de cartes au 1: 25 000 et 1: 50 000 qui s'est concrétisée mi-2004 par le démarrage d'un projet de développement – le projet *Nouvelle Carte de Base* – qui intégrera les avancées méthodologiques du COGIT dans ce domaine. En matière d'applications, on notera également l'avancée des recherches sur la mise en adéquation de données 2D et 2D5 pour des applications de type inondation. En 2004, les premiers résultats sur la correspondance entre différentes bases de données devraient être présentés.

Thématiques de recherche du laboratoire

Le laboratoire COGIT (Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique) étudie les problématiques liées à l'utilisation des données topographiques vectorielles. Les recherches portent sur des données déjà structurées sous la forme de bases de données et ont pour finalité générale soit d'améliorer ces bases (en terme de qualité, modélisation unifiée, procédures de mises à jour …), soit de faciliter leur utilisation (dérivation, accessibilité, représentation cartographique, utilisation pour des applications géographiques thématiques).

En 2003, les travaux de recherche du COGIT se sont articulés autour de cinq actions de recherche : l'étude des processus de mise à jour : *(EVOL – Gestion des évolutions dans les bases de données géographiques),* l'étude de la gestion des bases de données unifiées *(UNIBA – Unification des bases de données),* l'étude de l'automatisation de la généralisation *(GNOTO – Généralisation automatique)*, l'étude des méthodes d'accès à de l'information géographique *(CONSUL – accès aux données dérivées)*, et pour finir l'étude de l'usage des données dans certaines applications de risques *(RISQ – utilisation de l'information géographique dans les études de risques)*. EVOL, GNOTO et UNIBA sont conçues comme trois actions de recherches complémentaires dont les résultats devraient à terme faciliter la gestion unifiée des bases de données vectorielles produites par l'IGN : création, contrôle de cohérence, mise à jour et dérivation.

Si les recherches sur les processus de mise à jour se concentrent sur de faibles changements de résolution, les recherches en généralisation proposent des solutions entre des bases de données IGN présentant des différences de résolution sensibles : de la BD TOPO vers une base de données cartographiques au 1:50 000 (BDC_50), de la BD CARTO vers BDC_100 voire BDC_250). Les recherches en unification concernent elles des bases qui ont un facteur plus grand de changement de résolution (ex : BD TOPO vers BD CARTO). L'action de recherche RISQ a étudié certaines problématiques liées à l'utilisation des données IGN comme la mise en cohérence de données (MNT et 2D), la propagation des incertitudes lors de calculs probabilistes ou l'ajout de méthode d'analyse sur nos données. Enfin l'action de recherche CONSUL étudie les informations et les méthodes qu'il faut ajouter entre les bases de données 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 métadonnées ou par la conception d'interfaces plus intuitives.

Une nouvelle organisation …

Fin 2003, le laboratoire COGIT a repensé l'organisation des recherches autour de trois grands thèmes : l'aide à la *manipulation*, à *l'échange* et à *l'utilisation* de données géographiques. Les trois thèmes sont les suivants :

- Gestion des bases de données vectorielle

  Ce thème, qui recouvre la modélisation, la mise à jour et la fabrication de produits standards à partir de bases de données vectorielles, doit étudier en priorité, deux aspects qui aujourd'hui posent problème : la gestion commune de différentes bases de données et la fabrication de cartes ou de bases de données à partir de base de données vectorielles détaillées. Si ces deux actions de recherche sont actuellement centrées autour des bases de données IGN (comme exemple-type), la perspective à moyen terme est d'ouvrir le domaine d'application à d'autres données thématiques ;

- Accès et diffusion de l'information géographique

  On trouve dans ce thème la conception de nouvelles interfaces qui permettent d'aider un utilisateur à choisir les données (brutes ou traitées) qui correspondent à son besoin ainsi que la maîtrise des architectures et protocoles qui permettent la diffusion d'information, soit par Internet, soit par réseaux sans fil une fois que le bon produit a été choisi puis fabriqué.

- Étude de l'amélioration de l'utilisation et de la représentation graphique des données.

  Ce thème recouvre l'étude de cas complexes d'utilisation de l'information géographique vectorielle qui nécessitent la conception de méthodes d'analyse et de traitements ad hoc. Dans ce cadre, le laboratoire COGIT se met à la place d'experts qui vont avoir besoin de la richesse des données IGN mais pour qui les méthodes proposées par les SIG sont insuffisantes. Deux domaines particuliers ont été choisis :

1. les villes et transports ;
2. les risques et le 3-D.

Pour ces deux domaines, l'enjeu est de proposer des méthodes innovantes de modélisation, d'intégration, d'analyse et de représentation graphique de données vectorielles dans le cadre d'applications prédéfinies et jugées communément utiles : l'habitat, les réseaux de transport et les données 3-D.

Les domaines de compétence du laboratoires sont la modélisation des données spatiales, l'analyse spatiale, la cartographie, la mise en cohérence des données et des schémas, le travail sur les spécifications. En ce qui concerne les outils, deux SIG sont principalement mis en œuvre dans les travaux du laboratoire :

- **Lamps2** qui possède un module de généralisation réalisé lors d'un projet européen et enrichi en permanence par l'action de recherche en généralisation.
- **GéOxygène,** SIG interopérable développé au COGIT qui est utilisé par la plupart des actions de recherche. Ce logiciel doit faire l'objet d'un dépôt en Open source.

Faits marquants en 2003

Deux thèses, qu'Anne Ruas a encadrées à l'IGN, ont été soutenues en 2003 au laboratoire COGIT :

- Fabien Ramos, *Modélisation et Validation d'un Système d'Information Géographique 3D opérationnel,* thèse en informatique de l' Université de Marne-la-Vallée, spécialité en SIG, sous la direction de Bernard Cervelle, soutenue le 5 mai 2003 (Bourse CIFRE EADS avec le COGIT comme laboratoire d'accueil)
- Frédéric Hubert, *Modèle de traduction d'un besoin d'utilisateur pour la dérivation de données géographiques et leur symbolisation via le Web,* Thèse en informatique de l'université de Caen, sous la direction d'Anne Nicolle, soutenue le 7 juillet 2003 (financement IGN avec le COGIT comme laboratoire d'accueil)

Une seule thèse a démarré en 2003 au COGIT : celle de Sandrine Balley dont le titre provisoire est *Sélection et Structuration d'un jeu de données géographiques sur mesure via Internet*, sous la direction de Thérèse Libourel, l'encadrement scientifique étant assuré au laboratoire COGIT par Bénédicte Bucher.

Collaboration avec le GdR 2340 Sigma

Sous la responsabilité de Robert Laurini et de Pierre Dumolard, le GdR Sigma (2000-2004) se propose d'aborder des recherches selon les directions suivantes :

- axe 1. Gestion de l'environnement : risques naturels et technologiques, nuisances, aide à la décision ;
- axe 2. Analyse spatiale : gestion des flux et des réseaux, localisation, couplage de modèles, data mining spatial ;
- axe 3. Qualité : catalogage, métadonnées, standardisation, fiabilité des mesures, enrichissement, correction automatique, mise à jour, fusion de données, échange ;
- axe 4. Interagir : visualiser et IHM multimodale, décision coopérative, SIG participatif ;
- axe 5. SIG et mobilité : architecture des systèmes embarqués, objets et requêtes mobiles ;
- axe 6. Imagerie satellitaire et aérienne : analyse, aide à l'interprétation.

Le laboratoire COGIT participe à de nombreuses activités organisées par le GdR :

- participation aux Journées Cassini ;
- soumission d'articles à la Revue Internationale de Géomatique (RIG) ;
- participation à des séminaires
- review d'articles (Journées Cassini et RIG).

Projets Européens

Le laboratoire COGIT participe à un projet Européen : le projet SPIRIT. Le projet *SPIRIT* (IST-2001-35047) a commencé en juillet 2002 : (http://www.geo-spirit.com/) et se terminera fin juin 2005. Il a pour objectif de créer un moteur de recherche de documents Web et de données géographiques. Ce moteur doit interpréter les composantes spatiales d'un besoin d'utilisateur. Par exemple, il doit pouvoir comprendre la relation spatiale « est plus proche de » dans un besoin comme « les plages les plus proches de Paris ». Le moteur SPIRIT doit également être capable de fournir des réponses pertinentes alors même que les termes de la requête n'apparaissent pas nécessairement dans la ressource. Pour cela, SPIRIT doit développer des ontologies facilitant l'expression du besoin et enrichir les ressources web à l'aide de métadonnées décrivant leur contexte spatial. Hormis le laboratoire COGIT, les membres de ce projet sont des universitaires : université de Cardiff (Chris Jones), université de Hanovre (Monica Sester), Université de Sheffield (Marc

Sanderson, Dave Finch, Daniela Petrelli), Université de Zürich (Robert Weibel), Université d'Utrecht (Mark von Kreveld). La participation du laboratoire COGIT est essentiellement concentrée sur les métadonnées, les besoins des utilisateurs et l'évaluation.

Collaborations en France

CNES – MATIS – COGIT

Une étude sur l'extraction de MNE en milieu urbain sur images PLEIADES-HR a été demandé par le CNES à l'IGN. Cette étude concerne principalement le laboratoire MATIS, mais le laboratoire COGIT doit faire un état de l'art sur les modélisations vecteur 3D et les méthodes d'évaluation associées.

Organisation de séminaires

Anne Ruas est co-responsable avec William Mackaness de la Commission *Généralisation et représentation multiple* de l'Association de Cartographie Internationale (voir le site : http://ica.ign.fr). À ce titre, des séminaires et "tutorials" sont organisés comme le Workshop ACI à Paris (IGN) en 2003 (A. Ruas et C. Duchêne), réunion de trois jours (28-30 avril 2003), regroupant quarante participants venant de onze pays.

A.5 Les travaux du laboratoire LAREG

Olivier Jamet (responsable du thème Géodésie)

Introduction

Fort d'une quinzaine de chercheurs et d'ingénieurs, le laboratoire de recherches en géodésie (LAREG) conduit des recherches dans quatre domaines de la géodésie : la géodésie spatiale, les systèmes de référence, la détermination du champ de pesanteur terrestre et la géodynamique. Les deux premiers axes de recherche sont conduits dans le cadre du Groupement de recherche en géodésie spatiale (GRGS). À cette activité est associée la participation à plusieurs services scientifiques internationaux. Le laboratoire était dirigé jusqu'en octobre 2003 par Michel Kasser, qui prend, en novembre, la direction de l'École nationale des sciences géographiques (ENSG).

Points marquants en 2003

Géodésie spatiale

En géodésie spatiale, le laboratoire LAREG a conduit en 2003, des développements logiciels en collaboration avec l'Université de Berne, l'Université de Prague et le CNES pour permettre le traitement des mesures DORIS au sein du logiciel de traitement GPS de l'Université de Berne. À terme, ce travail contribuera à renforcer l'utilisation de DORIS à l'échelle internationale. Le laboratoire LAREG a, par ailleurs, été chargé par l'Association Internationale de Géodésie de la coordination de l'IDS (International Doris Service), en collaboration avec la société CLS, à la création de ce service lors de la XXIII^{ème}Assemblée générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale, en juillet 2003. La responsabilité de ce service est assurée par Martine Feissel-Vernier. En outre, le laboratoire LAREG poursuit son soutien à l'entretien des stations Laser de l'Observatoire de Calern (activité de Maurice Laplanche).

L'année 2003 est également marquée par le soutenance de la thèse de Muhammad Ali Sammuneh (thèse de l'Observatoire de Paris, dirigée par Martine Feissel-Vernier), intitulée « *Contribution au positionnement en temps réel par GPS – prédiction de la correction ionosphérique* ».

Effectif : Martine Feissel-Vernier (astronome, responsable de l'action de recherche), Michel Kasser (professeur des universités), David Coulot (ingénieur – doctorant), Karine Le Bail (doctorante), Muhammad Ali Sammuneh (doctorant), Maurice Laplanche (géomètre, observateur à l'OCA).

Systèmes de référence

Concernant les systèmes de référence, le laboratoire LAREG a été renouvelé, en juillet 2003, par l'Association Internationale de Géodésie comme centre de produit ITRS (International Terrestrial Reference System), c'est-à-dire comme centre chargé de l'établissement et de la diffusion de l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame).

L'ITRF est le repère de référence international pour pratiquement toutes les applications scientifiques et techniques modernes (navigation, géodésie, géodynamique, géophysique, etc). Son exactitude actuelle est au niveau du centimètre à l'échelle du globe. Les recherches actuelles visent à intégrer la détermination des paramètres de rotation de la Terre et la détermination du référentiel terrestre au sein d'un même calcul et à prendre en compte les observations sous la forme de séries temporelles. On notera, en 2003, le démarrage de la thèse de Juliette Legrand (thèse de l'Observatoire de Paris, dirigée par Zuheir Altamimi) sur la modélisation cinématique de la croûte terrestre et dont l'objectif est d'étudier l'apport des modèles de tectonique globale à la définition de l'origine en rotation du système de référence terrestre.

Au titre de ses activités de service, le laboratoire LAREG est également centre de calcul EUREF et contribue à l'International GPS Service (IGS), en collaboration avec l'ENSG et au Réseau GPS Permanent français (RGP) en collaboration avec le Service de la Géodésie et du Nivellement de l'IGN (SGN).

Effectif : Zuheir Altamimi (ingénieur – chercheur, responsable de l'action de recherche), Bruno Garayt (ingénieur), Juliette Legrand (doctorante).

Géodésie physique

L'objet de la géodésie physique est la détermination du champ de pesanteur terrestre et le calcul de géoïdes régionaux. Dans ce cadre, le laboratoire LAREG contribue aux activités du Bureau Gravimétrique International (BGI) en participant à la maintenance et au développement de la base des données gravimétriques mondiales (activité de Bernard Langelier). En 2003, on notera le démarrage d'études sur la représentation du champ de pesanteur en ondelettes sphériques, effectuées dans le cadre de la thèse d'Isabelle Panet (thèse de l'Institut de Physique du Globe de Paris, direction : Michel Diament et Olivier Jamet). Cette technique permettra, à terme, d'exploiter les observations satellitaires et les mesures faites à proximité du sol au sein d'une même procédure de calcul du champ de pesanteur.

En outre, l'année 2003 voit l'arrivée au laboratoire LAREG d'Henri Duquenne qui y poursuivra les recherches qu'il conduisait à l'École supérieure des Géomètres Topographes (ESGT) sur le calcul de géoïdes régionaux et sur la mise au

point d'un instrument de gravimétrie mobile (en collaboration avec l'ESGT) et à l'ENSG de Jérôme Verdun, enseignant-chercheur, qui participera aux recherches du laboratoire sur la gravimétrie aéroportée.

Effectif : Henri Duquenne (ingénieur – chercheur, responsable de l'action de recherche), Olivier Jamet (ingénieur – chercheur), Isabelle Panet (ingénieur – doctorante), Jérôme Verdun (agrégé de sciences physiques), Bernard Langelier (ingénieur détaché au BGI).

Géodynamique

Dans le domaine de la géodynamique, le laboratoire LAREG a participé à des études méthodologiques sur l'estimation de l'humidité atmosphérique par GPS et contribue au projet TIGA-PP de l'IGS (International GPS Service) par la mise en place d'un centre d'analyse de stations GPS permanentes co-localisées avec des marégraphes (mesure de la variation du niveau des mers). On peut souligner, en 2003, l'avancement notable des méthodes de tomographie atmosphérique, développées en collaboration avec le Laboratoire Dynamique de la Lithosphère de l'Université de Montpellier (UMR 5573). On notera également le démarrage de la thèse de Nicolas Bergeot (thèse de l'Institut de Physique du Globe de Paris, direction : Michel Diament et Marie-Noëlle Bouin), sur l'étude cinématique de la région des Vanuatu.

En 2003, le laboratoire LAREG a, en outre, organisé en collaboration avec l'ENSG et participé à l'animation de l'École d'été du GRGS intitulée « Outils de la géodésie spatiale pour les sciences de la Terre » , s'adressant à des chercheurs et enseignants souhaitant utiliser le GPS pour des applications géodynamiques. Cette école a rassemblé une quarantaine de personnes.

Effectif : Marie-Noëlle Bouin (ingénieur – chercheur, responsable de l'action de recherche), Nicolas Bergeot (doctorant)

Publications des laboratoires de l'IGN

La liste des publications des laboratoires se trouve en fin de Bulletin, au chapitre C, pages 147-156.

B. Quelques actions marquantes

B.1 Effets radiométriques en milieu urbain à grande échelle et correction des ombres

Gilles Martinoty

Introduction

Les avancées récentes dans le domaine des caméras aériennes permettent actuellement d'obtenir sans difficulté des images numériques à très haute résolution, avec un pixel pouvant facilement atteindre une résolution de l'ordre de 20 cm. De même, le domaine des nouveaux capteurs satellitaires haute résolution (résolution meilleure que le mètre), tels que Pléiades, QuickBird ou Ikonos, est en plein développement. Ces nouveaux capteurs apportent de nombreuses nouvelles informations, à la fois géométriques et radiométriques. En effet, avec l'amélioration de la résolution apparaissent de nouveaux phénomènes liés à la structure tridimensionnelle de la scène observée. Dans cet article, nous nous intéressons plus particulièrement aux effets radiométriques induits par les bâtiments et les autres structures présentes en milieu urbain. Aux résolutions considérées, les scènes urbaines apparaissent comme un des ombres. Cela implique environnement « rugueux », ce qui entraîne diverses spécificités radiométriques. On peut tout d'abord noter l'omniprésence que le terme d'éclairement direct n'est pas toujours présent et que les termes d'éclairement diffus peuvent devenir prépondérants. D'autre part, l'existence du sursol implique de tenir compte des phénomènes d'inter-réflexion notamment entre les bâtiments en vis-à-vis dans les « canyons » formant les rues. On parle souvent dans ce cas de « rétro-éclairage » des façades.

Ces caractéristiques, propres aux images haute résolution, n'ont commencé à être prises en compte que récemment. Nous rappellerons quelques travaux antérieurs concernant ces problèmes dans le paragraphe suivant. Pour notre part, nous avons développé un outil de simulation des éclairements reçus sur une scène quelconque, décrite par un modèle vecteur 3D, que nous détaillerons dans le paragraphe « *Description de l'outil de simulation* », page suivante. Nous avons utilisé cet outil pour évaluer l'importance des différents termes dans le cas réel d'une rue du centre-ville d'Amiens (chapitre « *Étude du cas réel d'une rue au centre-ville* », page 13). L'intérêt de se placer dans un cas réel est que l'on peut effectuer une validation des ordres de grandeur obtenus avec les éclairements réels notamment par le biais de correction des ombres sur les images.

En effet, si les simulations sont en accord avec la réalité, il doit être possible de « ré-éclairer » les zones à l'ombre dans les images aériennes réelles correspondant à la scène simulée, et ainsi d'obtenir une teinte réaliste en accord avec les zones au soleil situées à proximité. Nous verrons comment et pour quels résultats au chapitre « *Correction des ombres* », page 15. Ce faisant, nous pourrons également évaluer l'importance relative des différents termes de radiométrie sur la qualité visuelle du résultat. La correction des ombres présentant un intérêt intrinsèque pour une meilleure visualisation des images, il sera intéressant de voir si tous les termes d'éclairement sont nécessaires pour obtenir une correction des ombres satisfaisante, sachant que le traitement de grandes zones avec l'outil développé n'est pas envisageable pour des questions de temps calcul.

Travaux antérieurs

Du fait de l'émergence récente des capteurs permettant d'obtenir les images à très haute résolution, les travaux s'intéressant aux problèmes radiométriques décrits précédemment ne sont apparus que récemment. Initialement, les modèles classiques de transfert radiatif tels que 6S [VERMOTE et al 97] étaient adaptés au contexte satellitaire basse résolution avec une approximation en sol plat. Ces modèles ont été réutilisés ou étendus afin de prendre en compte des scènes présentant du relief et des zones aux propriétés radiométriques hétérogènes, tandis que de nouveaux codes de simulation sont apparus.

Le code Mystic [MAYER, KYLLING 01] permet ainsi de simuler des scènes 3D décrites par un modèle numérique d'élévation en utilisant la méthode de Monte-Carlo. Ce code ne semble pourtant pas avoir été utilisé à des résolutions aussi grandes que celles utilisées pour modéliser une scène urbaine. Le code Amartis [MIESCH et al 00] est également un outil de simulation de scènes définies par un profil 2D présentant du relief ou des hétérogénéités spatiales. Ce code a permis d'obtenir par simulation l'importance relative des différents termes de luminance au niveau du capteur (Cf. [MIESCH, BRIOTTET 01]) à l'ombre et au soleil sur un profil de rue. Le modèle DART-3D [GASTELLU-ETCHEGORRY et al 03], a été récemment étendu afin de pouvoir simuler des scènes 3D quelconques décrites par des voxels, et notamment des images aériennes de sites urbains. Ces divers codes ont jusqu'à présent surtout été utilisés en tant qu'outils de pure simulation permettant de choisir les propriétés de futurs capteurs (contraste potentiellement obtenu [GASCON et al 01], choix de bandes spectrales adaptées [MIESCH, BRIOTTET 01], etc.

Description de l'outil de simulation

Termes simulés

Les différents termes d'éclairement que l'on souhaite pouvoir simuler sont indiqués sur la figure B.1.1, ci-dessous. La source primaire de lumière correspond bien évidemment au soleil. Pour une surface plane, nous pouvons alors identifier trois contributions à l'éclairement d'un point (Cf. figure B.1.1, à gauche) :

- tout d'abord, le terme le plus évident est l'éclairement direct du soleil (E_{direct}), pour lequel il faut simplement tenir compte de l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère ;
- deuxièmement, l'atmosphère n'atténue pas seulement les rayons solaires, mais les diffuse également. Une deuxième source d'éclairement correspond donc à l'éclairement diffus provenant de l'ensemble du ciel (E_{diffus}) ;
- troisièmement, il existe un couplage entre le sol et l'atmosphère, pour lequel des rayons en provenance de divers points de la scène sont diffusés à de multiples reprises par l'atmosphère, ce qui contribue à une troisième source d'éclairement. Ce terme est d'un ordre de grandeur bien inférieur aux précédents et ne sera pas simulé dans notre outil.

Lorsque l'on tient compte de la rugosité de la scène, deux termes supplémentaires sont à prendre en compte, correspondant à de l'énergie réfléchie sur une surface avant d'atteindre le point considéré (Cf. figure B.1.1, à droite) :

- l'énergie directe du soleil peut se réfléchir sur une façade et constituer un 4ème terme d'éclairement ($E_{direct\text{-}réfléchis}$) ;
- de même, l'énergie diffuse du ciel réfléchie par un bâtiment contribue à un 5ème terme d'éclairement ($E_{diffus\text{-}réfléchis}$).

Ces deux termes sont regroupés dans la suite sous l'appellation $E_{réfléchis}$.

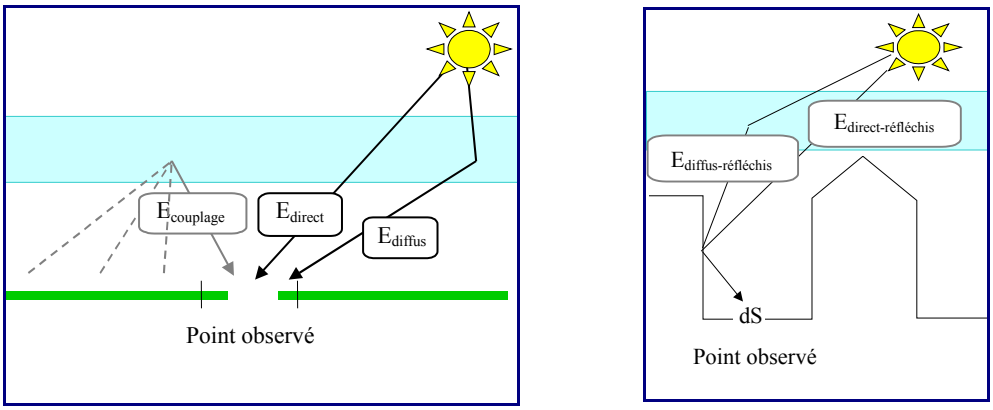


figure B.1.1 *: à gauche : sources d'éclairement d'un point en sol plat.*
À droite : sources d'éclairement supplémentaires dues au sursol.

Modélisation des éclairements

Afin d'obtenir un processus physique, nous avons utilisé les modèles du soleil et du ciel qui ont été validés dans le code 6S [VERMOTE et al 97]. Celui-ci nécessite de nombreux paramètres pour décrire l'atmosphère, en particulier le type, les proportions et la répartition des aérosols. Dans le cas d'une simulation, il est possible de préciser l'ensemble de ces paramètres et d'utiliser le modèle de ciel obtenu. Cependant, dans le cas réel d'une mission aérienne standard, il est bien évident que nous n'avons pas accès à l'ensemble de ces paramètres. Si l'on souhaite comparer les simulations obtenues avec les éclairements qui ont illuminé une image aérienne réelle, il est nécessaire d'utiliser des hypothèses simplificatrices. Fort heureusement, les missions aériennes n'ont lieu que par temps dégagé, avec une grande visibilité horizontale (~ 20 km), ce qui constitue une simplification forte. Ainsi, pour obtenir des éclairements potentiellement cohérents avec une mission aérienne donnée, nous utilisons dans 6S un modèle d'aérosols urbains standards, avec la visibilité comme seul paramètre.

La visibilité est facile à obtenir, puisque c'est une information sauvegardée par les aéroports. De plus, les réponses spectrales des trois caméras utilisées sont également prises en compte comme paramètres dans 6S. Ainsi, comme résultats de 6S, nous obtenons le spectre solaire et les éclairements émis par le ciel dans les conditions de la mission aérienne. Pour gérer des géométries tridimensionnelles complexes et tenir compte des modèles précédents issus de 6S, nous avons décidé d'utiliser un logiciel de raytracing physique, tel que Renderpark [BEKAERT et al 01]. On dispose de modèles vectoriels tridimensionnels des bâtiments formant la scène que l'on considère. Les sources lumineuses que sont le soleil et le ciel sont introduites dans la simulation selon la méthode décrite dans la suite.

Modélisation du ciel

Le ciel se comporte comme une source hémisphérique non homogène englobant l'ensemble de la scène. Nous discrétisons la voûte céleste en une multitude de facettes, chacune émettant une énergie donnée par un modèle de ciel obtenu avec 6S (cf. figure B.1.2, page suivante).

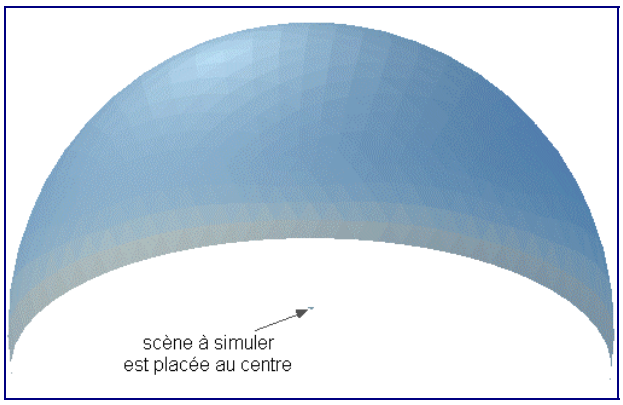


figure B.1.2 *: éclairements du ciel obtenus avec 6S formant la voûte céleste dans un raytracer*

Modélisation du soleil

Le soleil est inclus dans notre scène sous la forme d'une sphère lambertienne placée aux coordonnées obtenues à partir de la date et de l'heure souhaitées. Les proportions de cette sphère par rapport à son éloignement de la scène sont respectées, de sorte que l'angle solide apparent du soleil correspond bien à l'angle solide réel.

Obtention des termes d'éclairements souhaités

Pour obtenir les termes d'éclairement E_{direct}, E_{diffus}, $E_{réfléchis}$, il suffit de réaliser les simulations suivantes par raytracing. Pour obtenir E_{direct}, on ne met que le soleil dans la simulation et l'on ne permet pas de réflexion sur les facettes. De même pour E_{diffus}, on met uniquement le ciel sans réflexion. L'obtention des termes $E_{réfléchis}$ est plus délicate, car elle implique de connaître les propriétés de réflexion des matériaux constituant la scène. Pour une pure simulation, on peut mettre les modèles que l'on souhaite. Par contre, dans le cas d'une scène réelle, nous proposons la méthode suivante pour s'approcher des valeurs effectives présentes dans la scène. Nous utilisons les images réelles en tant que sources pour obtenir des estimations grossières des albédos des matériaux, en les considérant comme lambertiens. Nous utilisons alors la même technique que précédemment, en éclairant la scène obtenue avec le ciel et le soleil. En soustrayant du résultat obtenu les éclairements directs venant du ciel et du soleil E_{direct} et E_{diffus}, nous obtenons finalement une estimation des inter-réflexions entre les facettes. Bien entendu, ce n'est qu'une approximation en raison de l'hypothèse lambertienne utilisée, mais qui devrait être suffisante dans de nombreux cas.

Étude du cas réel d'une rue en centre-ville

Nous nous sommes intéressés au cas d'une rue d'Amiens, dont l'environnement est typique d'un milieu urbain dense en centre-ville. Comme on peut le voir sur la figure B.1.3, cette rue apparaît comme très encaissée entre deux bâtiments assez grands. La prise de vue (et la simulation) a eu lieu en mai 2001, ce qui correspond à une hauteur du soleil de 60°. La rue est ainsi en partie à l'ombre. La visibilité est fixée à 18 km. La figure B.1.3 montre également sur une autre image le côté éclairé de la rue : on peut constater que la peinture est plutôt bien réfléchissante, avec une composante rouge prépondérante.

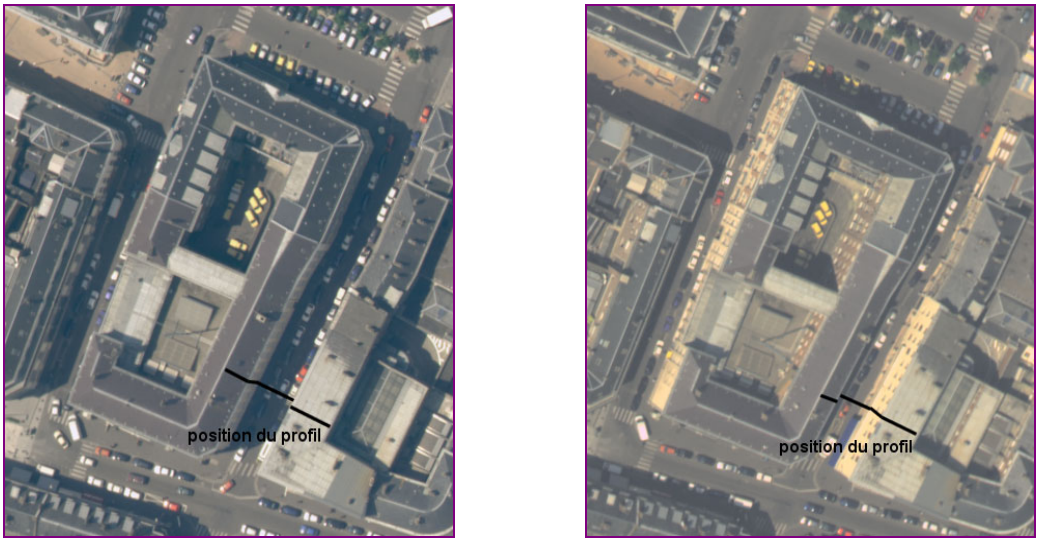


figure B.1.3 *: cas réel d'une rue en centre-ville*

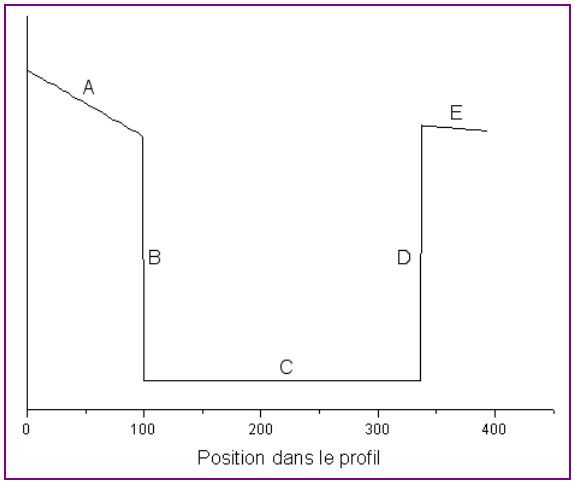


figure B.1.4 *: vue schématique du profil de la rue*

En utilisant l'outil précédemment décrit, nous pouvons obtenir l'importance relative des différents termes sur les différentes facettes, et notamment le long du profil indiqué en gras sur la figure B.1.3. Les résultats sont indiqués ci-dessous sur la figure B.1.5.

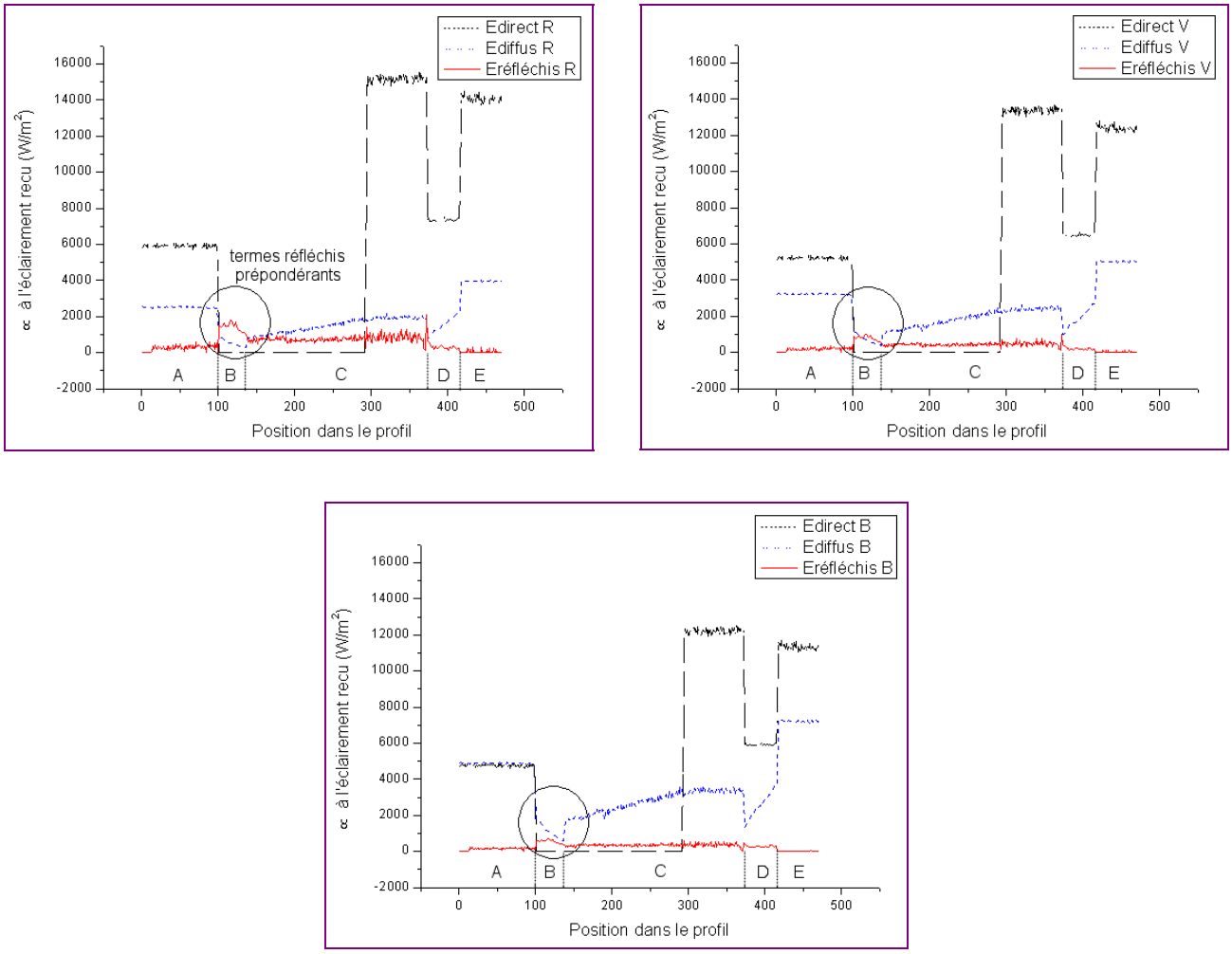


figure B.1.5 *: valeurs des différents termes d'éclairements le long du profil dans les trois canaux R,V,B*

Ces résultats appellent les commentaires suivants :

Terme E_{direct}

En ce qui concerne le terme E_{direct}, on observe fort logiquement différents paliers, correspondant respectivement au toit pentu à gauche (en éclairage plutôt rasant, θ_s~70°), à l'ombre projetée sur le mur vertical et sur une partie de la rue,

à l'éclairement reçu par le fond de la rue au soleil, à celui reçu par la façade au soleil et enfin à celui reçu par le toit plat à droite de la rue. Les facettes étant à chaque fois plates, on obtient des paliers qui correspondent à la variation de l'angle entre la normale à la facette et la direction du soleil.

Terme E_{diffus}

Après le plateau correspondant à l'énergie diffuse reçue par le toit en pente, on observe une très forte décroissance du terme E_{diffus} sur le mur vertical. Les valeurs sont jusqu'à plus de dix fois inférieures à celles reçues par le toit en pente (notamment tout en bas de la façade). Cela s'explique par le fait que l'énergie émise par la portion du ciel vue par cette façade est faible, puisqu'à l'opposé de la position du soleil. De plus, on observe qu'entre le haut et le bas de la façade, l'énergie reçue varie de près d'un facteur 2 sous l'effet de la diminution de la portion d'angle solide du ciel vu depuis la façade. De même, au fond de la rue, l'énergie décroît plus on entre dans l'ombre, puisque de moins en moins de ciel est vu. Ce phénomène d'ombres d'autant plus sombres que l'on se rapproche d'un bâtiment est facilement constatable sur des images aériennes réelles. La façade au soleil met en évidence également l'importance de la variation d'angle solide entre le bas et le haut du mur.

Terme $E_{réfléchis}$

En ce qui concerne les termes $E_{réflechis}$, les résultats sont particulièrement intéressants. Bien évidemment, ces termes sont nuls sur les deux toits puisqu' aucune surface n'est susceptible de réfléchir un rayonnement vers ces surfaces. C'est dans la rue elle-même qu'apparaissent les résultats les plus instructifs. Considérons tout d'abord la façade à l'ombre. L'essentiel de l'angle solide qu'elle intercepte correspond à la façade en regard, qui, elle, est en plein soleil. Le rayonnement en provenance de cette façade est donc particulièrement important : c'est ce terme qui devient largement prépondérant, devant E_{diffus}. De plus, un biais colorimétrique est introduit, puisque le rayonnement réfléchi présente la couleur de la façade au soleil. Au fond de la rue, le terme $E_{réfléchis}$ conserve une grande importance par rapport à E_{diffus}, notamment dans le rouge. Il n'est donc absolument pas négligeable. Ce n'est que dans les zones au soleil que l'importance relative de ce terme devient faible.

Correction des ombres

Principe

Les simulations précédentes ont un intérêt en elles-mêmes, afin d'avoir une idée précise des ordres de grandeur des différents termes d'éclairement. De plus, nous pouvons utiliser ces simulations afin de réaliser des corrections des ombres sur les images de la prise de vue aérienne. Ce faisant, nous effectuons également un contrôle indirect des simulations, puisque les zones ré-éclairées doivent avoir une teinte réaliste par rapport à leur environnement.

Afin de réaliser cette correction, nous utilisons les hypothèses suivantes. Nous ne connaissons pas *a priori* les propriétés de réflectances directionnelles des matériaux à l'ombre. Aussi nous plaçons-nous dans une hypothèse de matériaux lambertiens pour effectuer les corrections. Dans ce cadre, l'équation reliant les radiances des images aux éclairements reçus s'écrit :

$L = \rho$ (constante) / π . (E_{direct} + E_{diffus} + $E_{réfléchis}$) + $L_{parasite}$, avec ρ l'albédo (constant) du matériau.

Le terme $L_{parasite}$ correspond à l'ensemble de l'énergie « parasite » ne venant pas de la surface que l'on corrige. Il s'agit de la somme des termes suivants :

- $L_{atmosphère}$, l'énergie diffusée par l'atmosphère qui ne touche pas le sol, mais est directement (rétro-)diffusée vers le capteur ;
- $L_{direct\text{-}diffus}$, l'énergie venant directement du soleil, réfléchie par l'environnement de la surface que l'on considère, et qui contribue malgré tout à l'énergie semblant venir de la surface en raison de la diffusion par l'atmosphère ;
- $L_{diffus\text{-}diffus}$, l'énergie venant de l'ensemble du ciel, et réfléchie par l'environnement de la même manière que l'énergie précédente ;
- les autres termes (réflexions multiples, couplage avec l'atmosphère, etc) venant également de l'environnement.

Puisque dans l'approximation lambertienne, l'albédo est constant, nous pouvons écrire :

$L_{ombre} = \rho/\pi \,.\, (E_{diffus} + E_{réfléchis}) + L_{parasite}$
L_{soleil} (cherché) $= \rho/\pi \,.\, (E_{direct} + E_{diffus} + E_{réfléchis}) + L_{parasite}$

D'où :

$$\frac{L_{soleil} - L_{parasite}}{L_{ombre} - L_{parasite}} = 1 + \frac{E_{direct}}{E_{diffus} + E_{réfléchis}} .$$

C'est cette dernière équation qui nous permet de « rééclairer » les zones à l'ombre. Dans cette équation, la radiance L_{ombre} est connue puisque issue des images, tandis que les termes d'éclairement E_{direct}, E_{diffus} et $E_{réfléchis}$ sont issus de simulations. Reste à déterminer le terme $L_{parasite}$, qui joue un rôle plus important qu'il n'y paraît comme nous allons le montrer dans le paragraphe suivant.

Importance et modélisation du terme de « voile » $L_{parasite}$

En plus de valeurs des simulations d'éclairements réalistes, une bonne connaissance du terme d'énergie parasite est en fait indispensable pour obtenir une correction satisfaisante des ombres. En effet, comme on peut le constater sur l'équation en bas de la page précédente, ce terme est soustrait des radiances à l'ombre, et le résultat est ensuite multiplié par le terme de droite, qui est un grand nombre en général. Or, les radiances à l'ombre sont par définition faibles. Ainsi, une petite erreur sur la détermination de $L_{parasite}$ peut conduire à de très grandes erreurs sur le résultat final. Avoir une bonne évaluation de ce terme est donc cruciale.

Malheureusement, cette évaluation est loin d'être évidente. Traditionnellement, on utilise la méthode dite du « point noir » pour évaluer $L_{parasite}$ [KAUFMAN, SENDRA 88]. Il s'agit de trouver un point à l'ombre, sur une surface la plus sombre possible (de l'eau par exemple). De cette manière, on peut considérer que l'énergie provenant de la zone elle-même est pratiquement négligeable, et on ne mesure donc que le terme $L_{parasite}$. Cependant, comme on l'a indiqué précédemment, les termes qui constituent $L_{parasite}$ dépendent fortement de l'environnement autour du pixel. Sa valeur est ainsi très variable au sein d'une même image. Cette variabilité correspond à celle des effets directionnels de l'environnement du point. Considérons à titre d'illustration la figure B.1.6 qui met en évidence la valeur des ombres dans une image.

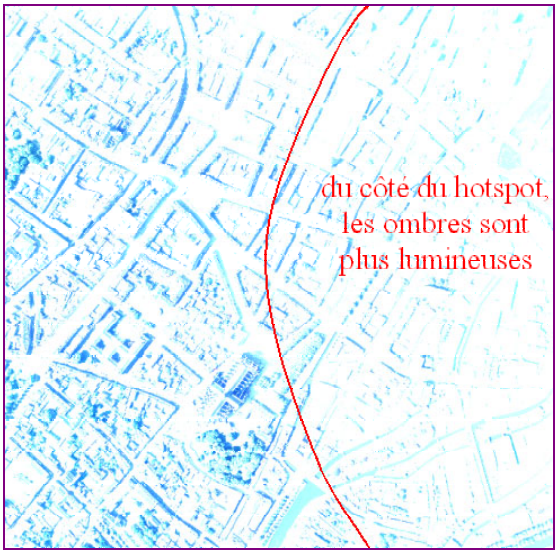


***figure B.1.6** : mise en évidence de la valeur relative des ombres dans une image (plus clair = plus d'énergie)*

On reconnaît le phénomène de hotspot, à savoir que la scène semble plus claire lorsque la direction d'observation se rapproche de la direction du soleil (à droite sur l'image). Cela est dû notamment aux ombres qui sont de moins en moins visibles lorsque l'on s'approche du soleil. S'il ne s'agissait que de cela, le hotspot ne serait qu'une impression visuelle. Mais en réalité, la scène, et en particulier les ombres, ont vraiment des valeurs radiométriques plus élevées du côté du hotspot. Cela est dû aux effets géométriques de l'environnement (par exemple les réflexions sur les façades), qui du fait de la diffusion par l'atmosphère contribuent à augmenter l'ensemble de la luminosité, y compris celle des ombres.

En conséquence, une modélisation classique ne prenant en compte que la variation d'épaisseur optique (cf. par exemple [BOLDO 02]) nous semble insuffisante pour rendre compte de l'évolution des radiométries dans les ombres au sein des images de scènes urbaines. Nous avons donc comparé les résultats obtenus avec des modèles dont la forme prend en compte le phénomène de hotspot.

- Nous avons premièrement retenu le modèle de hotspot de Hapke [HAPKE 81], qui prend la forme suivante : $L_{parasite} = \dfrac{K}{1 + 1/h \cdot \tan(g/2)}$, où K et h sont deux paramètres à déterminer, et g est l'angle entre la direction d'observation et la direction d'illumination par le soleil.

- Un deuxième modèle de hotspot évalué est celui proposé dans [LE MEN, BOLDO 00], qui s'écrit : $L_{parasite} = K \cdot \left(k + (1-k) \cdot \dfrac{1 - e \cdot \cos\theta_s}{1 - e \cdot \cos g} \right)$, où K, k et e sont trois paramètres à déterminer, θ_s est l'angle zénithal du soleil.

- À titre de comparaison, nous prenons également en considération le modèle classique ne prenant en compte que la variation d'épaisseur optique :

$L_{parasite} = \dfrac{K}{\cos\theta_v}$, où K est le paramètre à déterminer, et θ_v l'angle entre la verticale et la direction d'observation.

Pour évaluer les paramètres, nous découpons l'image en grandes dalles régulières (par exemple : 100 m par 100 m), et cherchons le minimum de radiométrie dans chacune de ces dalles. Le modèle est alors obtenu par une minimisation par moindres carrés. A titre d'exemple, pour l'image seize bits visible sur la figure B.1.7, à gauche, nous obtenons les résultats contenus dans le tableau B.1.1, ci-dessous.

tableau B.1.1 *: résultats obtenus avec les différents modèles de $L_{parasite}$ (image 16bits)*

modèle	paramètres R	paramètres V	paramètres B	R^2 rouge	R^2 vert	R^2 bleu	res. moy. R	res. moy. R	res. moy. R
1/cos(θ_v)	K=3680	K=4970	K=6333	0,1	0,12	0,1	607	698	699
Hapke	K=6156 h=0,46	K=67780 h=0,55	K=8862 h=0,82	0,67	0,68	0,68	368	422	416
Le Men	K=3673 k=0,795 e=0,966	K=4962 k=0,851 e=0,979	K=6486 k=0,773 e=0,960	0,69	0,75	0,68	354	375	410

Nous constatons que le modèle en 1/cos(θ_v) est effectivement largement insuffisant pour décrire les radiométries des ombres. Les deux autres modèles correspondent à des modélisations bien meilleures. Les deux modèles donnent des résultats sensiblement équivalents. Cependant, on peut noter que le modèle de Hapke ne nécessite que deux paramètres, alors que l'autre modèle en contient trois. Pour avoir une meilleure compréhension des modélisations obtenues, nous avons tracé les résidus obtenus dans chaque cas sur les figures B.1.7 et B.1.8.

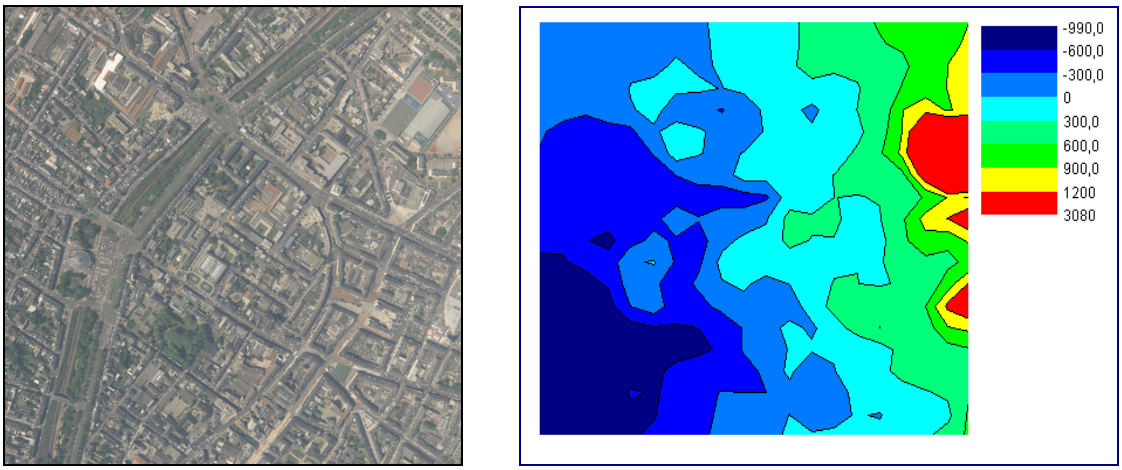


figure B.1.7 *: image initiale et résidus obtenus avec le modèle en 1/cos(θ_v)*

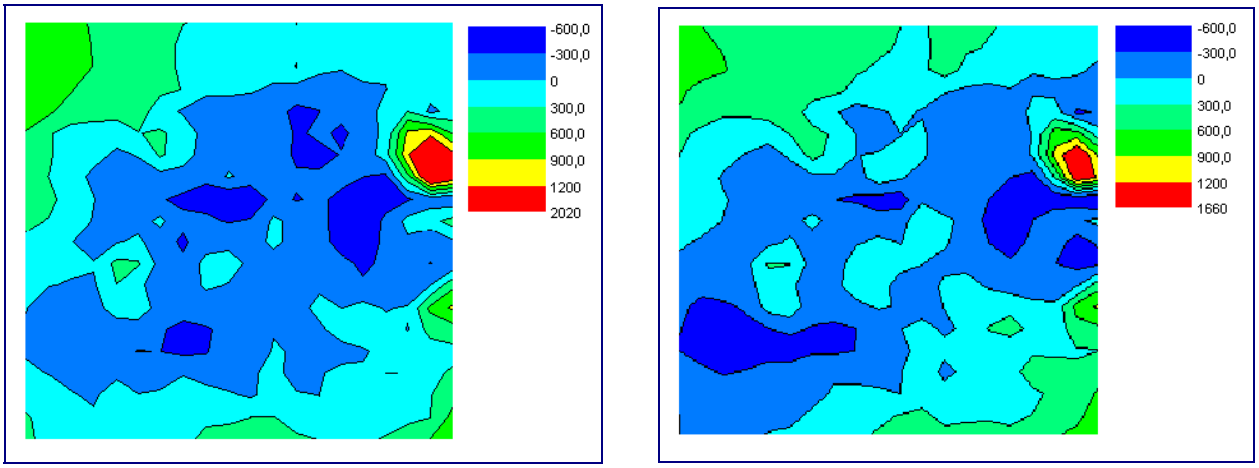


figure B.1.8 *: résidus obtenus avec le modèle de Hapke et le modèle de Le Men*

Pour le modèle en 1/cos(θ_v), nous voyons apparaître nettement une tendance non modélisée de la gauche vers la droite due précisément à l'existence du hotspot. Le résidu très important à droite est dû à la présence d'un parc aquatique très étendu dans l'image, pour lequel on ne trouve pas de valeur d'ombre pertinente.

Pour le modèle de Hapke, nous obtenons des résidus présentant une symétrie plutôt circulaire. Cela met en évidence le fait que dans ces deux modèles nous n'avons pas tenu compte de la variation de l'épaisseur optique. Ainsi, nous avons encore évalué le modèle suivant :

$$L_{parasite} = \frac{K / \cos(\theta_v)}{1 + 1/h \cdot \tan(g/2)}.$$

Nous obtenons les résultats et la carte des résidus suivants :

tableau B.1.2 *: résultats obtenus avec le modèle Hapke/cos(θ_v)*

modèle	paramètres R	paramètres V	paramètres B	R^2 rouge	R^2 vert	R^2 bleu	res. moy. R	res. moy. R	res. moy. R
Hapke/cos(θ_v)	K = 5749 h = 0,50	K = 7290 h = 0,60	K = 8350 h = 0,89	0,73	0,77	0,72	330	360	387

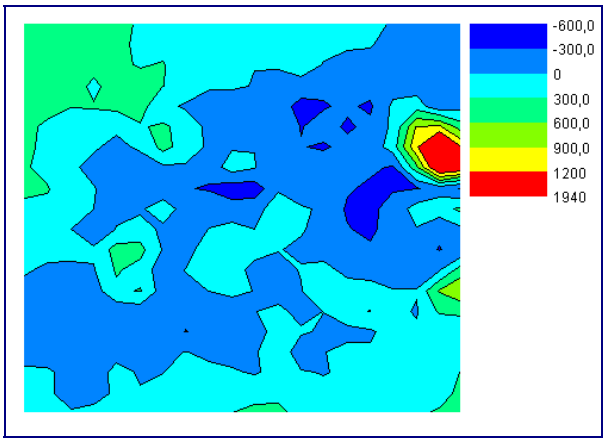


figure B.1.9 *: résidus obtenus avec le modèle Hapke/cos(θ_v)*

L'ajout du terme en 1/cos(θ_v) améliore effectivement les résultats, même si ce n'est pas spectaculaire. Le résidu moyen est alors de l'ordre de 350 niveaux (sur 16 bits), soit entre 5 et 10% de la valeur de l'ombre. Nous verrons plus loin que cette précision est suffisante pour notre application. D'autre part, pour des images successives correspondant à des scènes urbaines, nous obtenons les résultats contenus dans le tableau B.1.3, ci-dessous.

tableau B.1.3 *: résultats obtenus sur des images successives d'une même bande avec le modèle Hapke/cos(θ_v)*

images successives	paramètres R	paramètres V	paramètres B
1	K = 5675 ; h = 0,49	K = 7162 ; h = 0,67	K = 7768 ; h = 1,10
2	K = 5313 ; h = 0,57	K = 7007 ; h = 0,74	K = 7738 ; h = 1,18
3	K = 5749 ; h = 0,50	K = 7290 ; h = 0,60	K = 8350 ; h = 0,89
4	K = 5103 ; h = 0,48	K = 6900 ; h = 0,64	K = 8072 ; h = 0,84
5	K = 4913 ; h = 0,52	K = 6600 ; h = 0,68	K = 7629 ; h = 0,99

En dépit de la variabilité des scènes urbaines vues dans chaque image, les paramètres trouvés restent relativement stables entre chaque image. Cette constatation est satisfaisante, puisque l'environnement et l'atmosphère restent constants entre deux prises de vue rapprochées dans une même bande. Par contre, dès que l'on se situe à la limite entre des scènes urbaines et des scènes rurales, le modèle ne converge plus. Cette modélisation et la méthode de détermination associée semblent pratiquement caractéristiques des scènes urbaines.

Exemples de correction des ombres

Disposant du modèle ci-dessus pour le terme $L_{parasite}$ et des simulations des éclairements dans les conditions des prises de vue, nous pouvons « ré-éclairer » les ombres grâce aux équations décrites précédemment. Avant d'étudier la rue encaissée entre deux bâtiments décrite au début de cet article, nous commençons par considérer le parvis devant la cathédrale d'Amiens. Il est utile d'étudier ce cas, car le parvis est particulièrement grand et dégagé.

La façade de la cathédrale étant à l'ombre, il n'y a pratiquement pas d'énergie réfléchie qui éclaire le parvis, ce qui nous permet de vérifier les importances relatives de E_{direct} et E_{diffus} uniquement. Nous obtenons le résultat visible sur la figure B.1.10.

figure B.1.10 *: correction d'ombres sur le parvis de la cathédrale d'Amiens*

Seule l'ombre projetée par la cathédrale est corrigée, car nous disposons uniquement du modèle 3D de la cathédrale, et pas de celui des divers bâtiments entourant la place. De même, le bâtiment situé en bas à droite est corrigé comme s'il appartenait au parvis, car il n'est pas modélisé dans la base de données 3D. Si l'on se focalise sur les radiométries obtenues sur le parvis lui-même, on peut constater que le résultat visuel est plutôt satisfaisant, comme le confirme le profil réalisé le long de la ligne indiquée sur l'image précédente (cf. figure B.1.11, ci-dessous). Les différentes teintes du parvis initialement à l'ombre apparaissent clairement. Nous pouvons déduire de ce résultat que, même si l'on ne connaît pas précisément la composition de l'atmosphère, prendre un modèle standard d'aérosols urbains paramétré par la visibilité est suffisant pour nos applications, dans lesquelles la visibilité est grande.

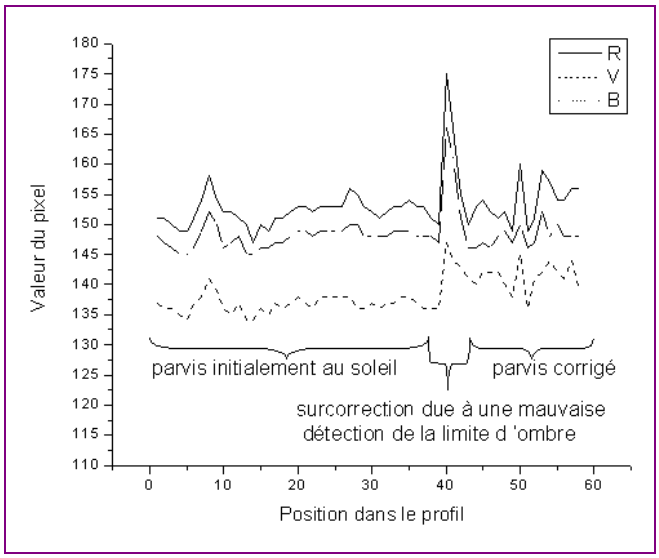


figure B.1.11 *: profil dans l'image corrigée*

Venons en maintenant au cas de la rue encaissée. En prenant en compte l'ensemble des termes E_{direct}, E_{diffus}, $E_{réfléchis}$ évalués précédemment, nous obtenons le résultat visible sur la figure B.1.12, page suivante (photo du milieu). Ce résultat est relativement satisfaisant, les teintes des trottoirs étant plutôt bien conservées. On constate cependant qu'il reste une légère tendance rougeâtre dans la rue la plus à droite de l'image, probablement due à un défaut de correction du terme $E_{réfléchis}$ malgré nos efforts. Pour mieux se rendre compte de la qualité de cette correction, il est intéressant de voir le résultat obtenu sans tenir compte du terme $E_{réfléchis}$, qui est le plus difficile à calculer. On obtient le résultat visible à droite sur la figure B.1.12. Comme on pouvait s'y attendre, la façade est complètement saturée, puisque sur cette façade le terme dominant est le terme $E_{réfléchis}$. On constate également que le fond de la rue apparaît beaucoup plus rouge que précédemment. Même dans cette zone, il est nécessaire de tenir compte du terme $E_{réfléchis}$ pour obtenir un résultat visuellement acceptable.

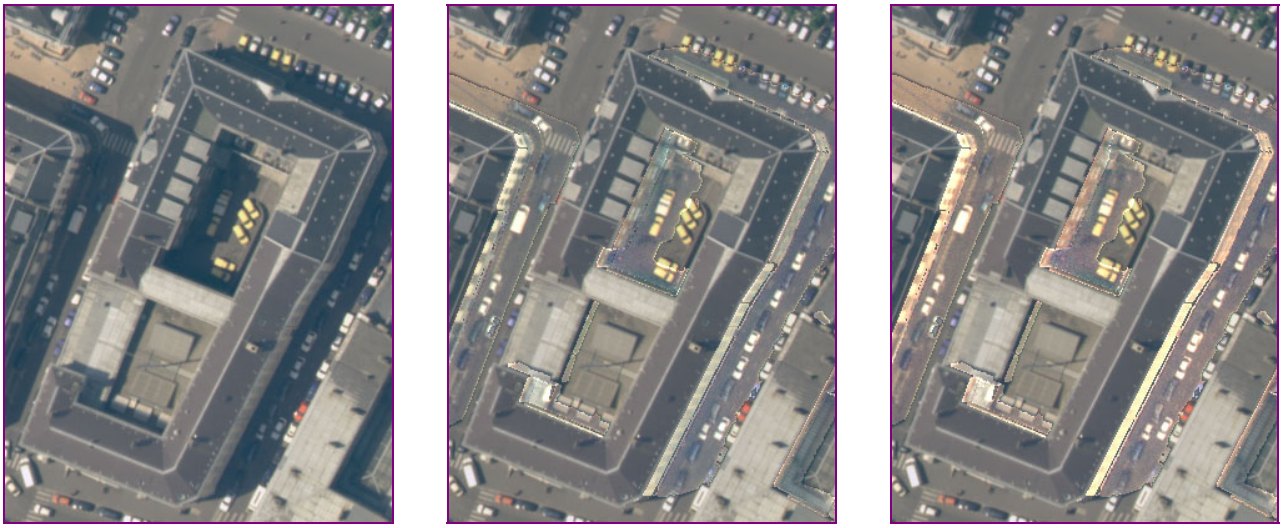


figure B.1.12 *: correction des ombres dans la rue encaissée.*
À gauche, image initiale. Au milieu, image corrigée avec $E_{réfléchis}$*. À droite, image corrigée sans* $E_{réfléchis}$*.*

Conclusion

À travers les résultats précédents, nous avons tout d'abord mis en évidence qu'il est possible d'obtenir des simulations d'éclairement satisfaisantes même lorsque la composition exacte de l'atmosphère n'est pas connue précisé-ment, pourvu que la visibilité soit importante, comme c'est le cas pour des prises de vue aériennes. Ces simulations permettent de montrer que les termes d'éclairements réfléchis peuvent devenir dominants dans certaines ombres. L'application sur des images réelles à la correction des ombres confirme ce résultat. Il est ainsi absolument indispen-sable de tenir compte des termes d'éclairements réfléchis en milieu urbain à grande échelle. Dans une optique d'appli-cation pratique à la correction des ombres, cette conclusion est évidemment gênante, puisque ce terme est long et délicat à calculer précisément. Néanmoins, on peut se demander si une correction complète des ombres est souhai-table dans un objectif d'amélioration de la qualité de la visualisation. En effet, la compréhension globale de la scène est en réalité fortement diminuée lorsque toutes les ombres sont corrigées, l'image apparaissant sans « relief ». Il serait donc peut-être plus souhaitable de ne corriger que partiellement les ombres, auquel cas les différents termes d'éner-gies pourraient éventuellement nécessiter une précision moindre.

Références

[BEKAERT et al 01] P. Bekaert, F. Suykens de Laet, P. Peers, V. Masselus and RenderPark : *A test-bed system for global illumination,* World Wide Web, http://www.renderpark.be, 2001.

[GASCON et al 01] F. Gascon, J.-P. Gastellu-Etchegorry and M.-J. Lefèvre : *Radiative Transfer Model for simulating High-Resolution Satellite Images,* IEEE Geoscience and Remote Sensing 39(9) : pp. 1922-1926, 2001.

[GASTELLU-ETCHEGORRY et al 03] J.-P. Gastellu-Etchegorry, E. Martin and F. Gascon : *DART : A 3-D model for simulating satellite images and surface radiation budget,* in International Journal of Remote Sensing, 25 (1) : pp. 75-96, 2003.

[HAPKE 81] B. Hapke : *Bi-directional reflectance spectroscopy, 1. Theory,* in Journal of Geophysical Research, Vol. 86, pp. 3039-3054, 1981.

[KAUFMAN, SENDRA 88] Y.J. Kaufman and C. Sendra : *Algorithm for atmospheric Corrections,* in Int. J. Rem. Sens., vol. 9, pp. 1357-1381, 1988.

[MAYER, KYLLING 01] B. Mayer and A. Kylling : *Three-dimensional radiative transfer over inhomogeneous terrain,* IAMAS 2001 Assembly, Innsbruck, July 10-July 18, 2001.

[MIESCH et al 00] C. Miesch, X. Briottet, Y. Kerr and F. Cabot : *Radiative Transfer Solution for rugged and heterogeneous Scene Observations,* in Applied Optics, Volume 39, Issue 36, pp. 6830-6846, décembre 2000.

[MIESCH, BRIOTTET 01] C. Miesch and X. Briottet : *Radiance coming from shaded areas in urban scene,* IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Rome, novembre 2001.

[VERMOTE et al 97] E.F. Vermote, D. Tanré, J.-L. Deuze, M. Herman and J.-J. Morcrett : *Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum : an overview,* in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 35 (3), pp. 675-686, mai 1997.

Publications

[BOLDO 02] D. 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.

[LE MEN, BOLDO 00] H. Le Men & D. Boldo : *Mosaïque automatique d'ortho-photographies,* Symposium « Reconnais-sance des Formes et Intelligence Artificielle » (RFIA), volume III, pages 325-336, laboratoire MATIS, IGN-SR-02-002-C-HL, février 2000.

B.2 Modélisation 3D automatique terrestre d'environnements urbains et complexes à très grande échelle

Nicolas Paparoditis, Ouided Bentrah, Matthieu Deveau, Olivier Tournaire & Lionel Pénard

Cet article décrit le contexte, la problématique, les objectifs et les travaux en cours de la nouvelle équipe ARCHI « *Photogrammétrie Terrestre et Architecturale* » du laboratoire MATIS de l'IGN. Ces travaux s'inscrivent dans une perspective de définition de produits futurs et de mise au point de moyens d'acquisition et de méthodologies de traitement pour la constitution de futures bases de données urbaines tridimensionnelles photo-réalistes à très grande échelle. Ces données devront permettre de répondre aux besoins d'applications variées allant de l'aménagement paysager à la conservation du patrimoine en passant par la prospection et le tourisme virtuels.

L'IGN a une expérience importante de recherche et de production dans la fabrication de ces modèles 3D à partir d'images aériennes (voir figure B.2.1). Toutefois, les images et autres données aériennes ne permettent pas de modéliser géométriquement et radiométriquement l'ensemble des objets et détails que l'on souhaiterait voir apparaître, pour certaines applications, dans ces futures bases de données, par exemple les façades, les édifices remarquables, le mobilier urbain ... L'imagerie terrestre est nécessaire et complémentaire de l'imagerie aérienne pour dresser la cartographie urbaine la plus complète possible.

figure B.2.1

Modèle 3D élaboré à partir d'images aériennes.

Le contenu d'une base de données 3D urbaine très grande échelle à vocation universelle est d'autant plus difficile à spécifier que les besoins utilisateurs sont très variés en termes de types d'objets à représenter, de détails sur ces objets, et de précision sur la localisation relative et absolue de ces objets. Le monde urbain n'a aucun intérêt à être modélisé avec égalite de détail et de précision en tout point de l'espace et l'on comprend assez bien que les niveaux de détails et de précision doivent être adaptatifs à l'intérêt qui sera porté aux objets, par exemple que les édifices *dits* remarquables soient plus finement décrits que les autres.

Il est en revanche impératif que cette base de données contienne une couche de base composées d'images géoréférencées (avec la couverture la plus complète possible), à partir de laquelle un utilisateur peut extraire à partir des images, par des outils de saisies adéquats, des objets 3D de formes et de localisation très précises. Ceci permettra à l'utilisateur de modéliser le monde avec une complexité à hauteur de ses besoins et avec ses propres spécifications.

Dans cette logique, les travaux de l'équipe ARCHI s'articulent autour de quatre thèmes de recherches complémentaires et de complexité de modélisation progressive : STÉRÉOPOLIS, MÉTROPOLIS, MACROPOLIS et SPÉLÉOPOLIS (voir figure B.2.2, page suivante).

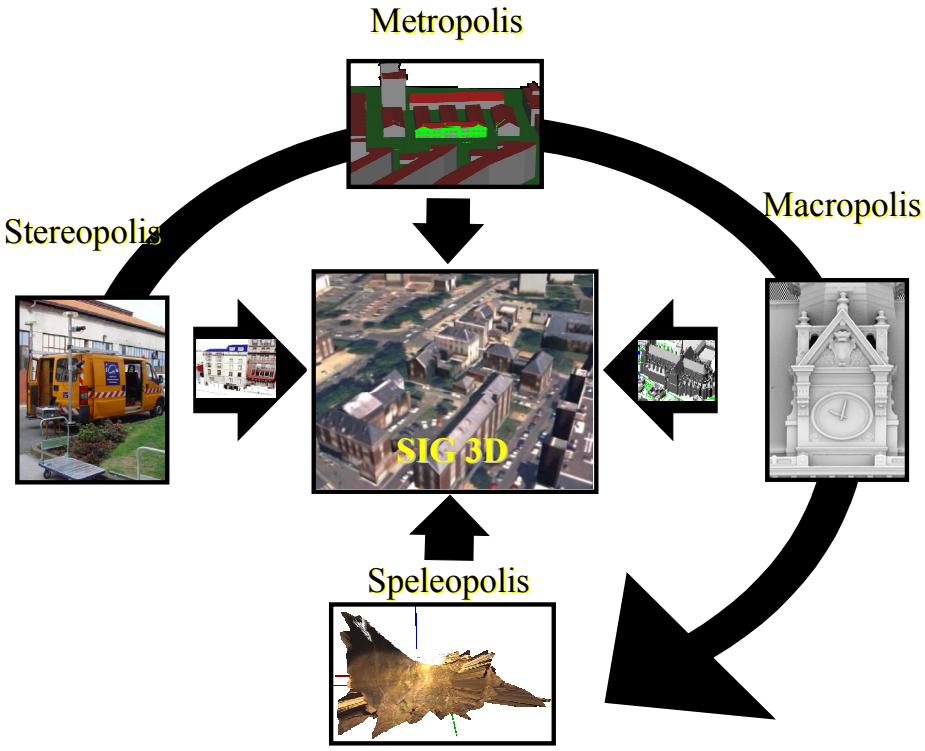


figure B.2.2

Architecture du projet « Photogrammétrie Architecturale ».

STÉRÉOPOLIS : acquisition d'images terrestres géoréférencées (« prêtes à la saisie 3D »)

La couche de base, que nous venons d'introduire précédemment, sera constituée de couples d'images terrestres stéréoscopiques géoréférencées très finement, acquises par le système de cartographie mobile STÉRÉOPOLIS, système développé au sein de l'équipe ARCHI avec la collaboration du laboratoire OEMI. STÉRÉOPOLIS est un véhicule équipé d'un ensemble de caméras haute résolution qui imagent à la fois les façades, la voirie et le mobilier urbain.

Le dispositif sera composé, à terme, de trois couples de caméras : deux couples de bases verticales stéréoscopiques divergentes (imageant les façades de part et d'autre du véhicule) et un couple de base stéréoscopique horizontale (imageant le corps de rue). Les caméras utilisées sont des caméras 4 000 x 4 000, développées au laboratoire OEMI pour de la prise de vue aérienne. Elles ont une très grande dynamique (de l'ordre de 2 000 niveaux) et un bruit très faible (rapport signal à bruit de 300), ce qui leur confère une très grande résolution radiométrique (voir figure B.2.3, page suivante).

L'acquisition des images par le système est parfaitement synchrone (à 1 ou 2 ms près), ce qui est un net avantage sur des caméras vidéos dont la synchronisation est classiquement de l'ordre de 1/25ème de seconde. Les bases stéréoscopiques verticales sont divergentes de manière à couvrir un champ vertical plus important afin de couvrir l'ensemble de la façade pour les façades les plus proches. D'autre part, sur le recouvrement des base verticale (celle-ci étant étalonnée) joue le rôle d'un télémètre (par appariement d'images). L'étalonnage géométrique de chacune des caméras et les positions et orientations relatives des caméras entre elles sont mesurées sur un polygone d'étalonnage.

En général, dans ce type de systèmes de cartographie mobile, le positionnement et l'orientation de la plate-forme dans l'espace sont donnés par une fusion de données issues de capteurs de géoréférencement direct tels que GPS, centrale inertielle et odomètres.

Toutefois, en milieu urbain dense de type européen, les masques et les multi-trajets GPS sont tels qu'on ne peut reposer uniquement sur le GPS même intégré avec une centrale inertielle et des odomètres pour estimer la cinématique de la plate-forme. L'originalité du système de géoréférencement de STÉRÉOPOLIS est que l'image est utilisée comme le sous-système principal de détermination de la localisation et de l'orientation relative et absolue de la plate-forme dans l'espace, voir : [BENTRAH et al 03], [BENTRAH et al 04a] et [BENTRAH et al 04b].

Le géoréférencement global et précis des clichés est obtenu par un système automatique d'« icono-triangulation » (triangulation à partir d'images) qui intègre des primitives de liaisons points et segments et comme primitives d'appuis des segments horizontaux et verticaux de la scène et des lignes blanches de marquage au sol (reconstruites à partir de la base stéréoscopique horizontale) appariées avec les éléments d'une base de données de marquage au sol [TOURNAIRE 04], construite à partir d'images aériennes.

1
2
3
4

figure B.2.3

1. *Vue du véhicule STÉRÉOPOLIS.*
2. *Exemple du champ couvert par une des bases verticales.*
3. & **4.** *Extraits d'images montrant la grande résolution géométrique et radiométrique des caméras.*

MÉTROPOLIS : modèles de façades, ortho-images de façades et outils de mesures 3D dans la ville

Les outils commerciaux de restitution manuelle photogrammétrique permettant l'exploitation et la valorisation d'images stéréoscopiques existent depuis longtemps et sont aujourd'hui disponibles à des prix abordables. Toutefois, la restitution manuelle reste une opération très longue et coûteuse.

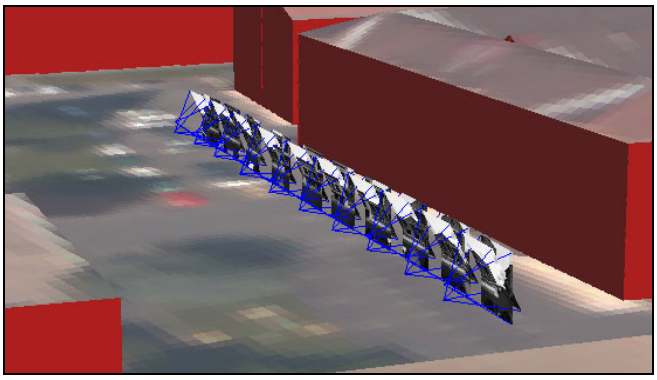


figure B.2.4

Ensemble d'images géoréférencées de la Photothèque de l'IGN.

figure B.2.5

Opératrice restituant une scène 3D.

Dans ce contexte MÉTROPOLIS cherche à mettre au point des outils automatiques pour la production de données à valeur ajoutée, à partir des images de STÉRÉOPOLIS : ce sont par exemple des Modèles Numériques de Façades (MNF), des ortho-images de façades pour la texturation des modèles, des modèles de gouttières et des Modèles Numériques de Marquages Routiers pour le recalage fin de véhicule en milieu urbain.

Ces produits permettront également d'améliorer la qualité de localisation et la richesse de description géométrique des façades dans les modèles 3D réalisées à partir des images aériennes. En effet, on peut constater sur la figure B.2.7 que la façade reconstruite à partir de la modélisation aérienne (par extrusion de la limite de gouttière) est de forme caricaturée et de localisation approximative (la limite de gouttière n'est pas exactement la façade). Afin de palier ces problèmes on pourra réinjecter les limites de gouttières générées à partir des images terrestres dans les processus automatiques de modélisation tridimensionnelle des toits afin d'obtenir des modèles 3D avec une parfaite cohérence aérienne et terrestre.

figure B.2.6

Ortho-image de la façade de la Photothèque de l'IGN réalisée avec le modèle de façade aérien.

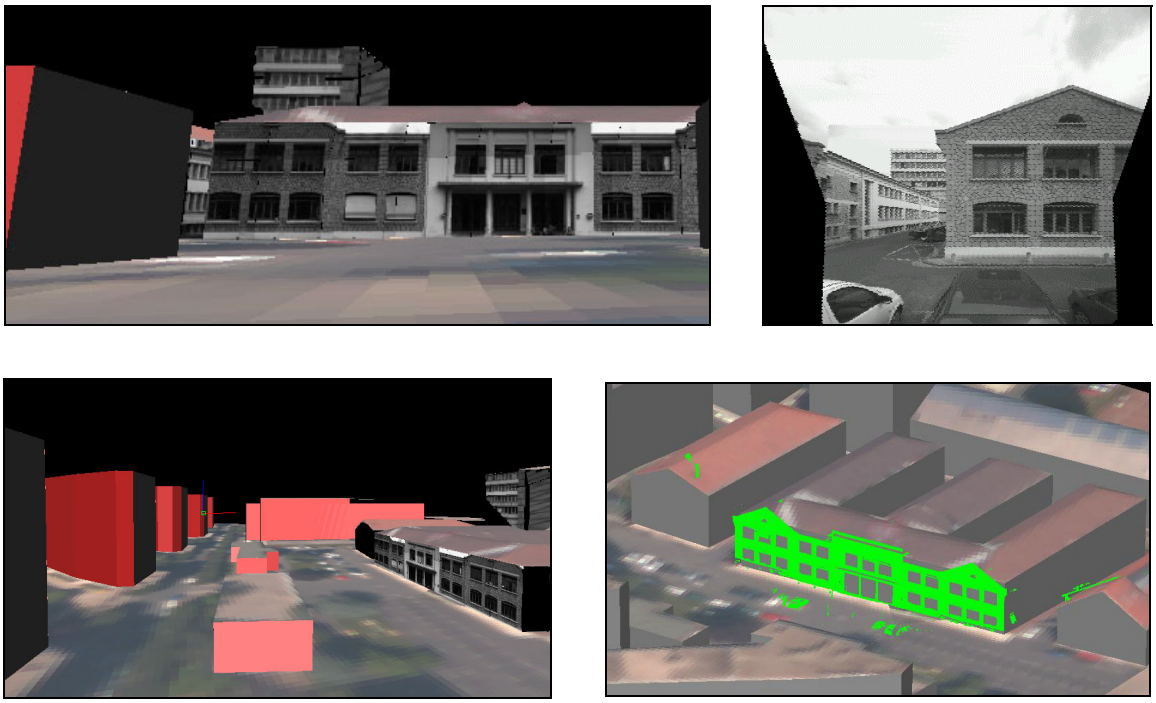


figure B.2.7

Texturation du modèle 3D de l'IGN.

On peut constater que la façade 3D de la Photothèque issue du modèle aérien (un rectangle) est imprécise et caricaturée : la partie supérieure du bâtiment a été tronquée.

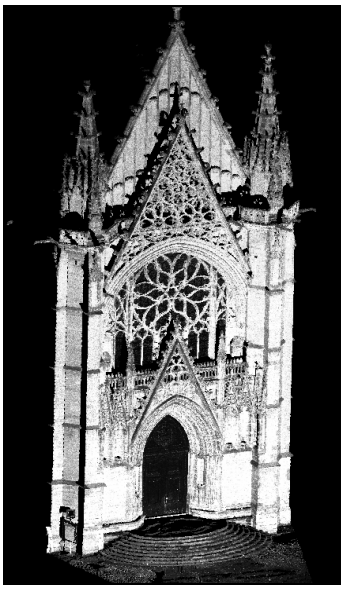
En vert, le type de modèle 3D que l'on peut reconstruire à partir des images terrestres et réinjecter dans le modèle aérien.

MACROPOLIS : modélisation 3D d'édifices remarquables

Dans des perspectives de réalité virtuelle urbaine et de tourisme virtuel, il est vraisemblable que les modèles 3D élaborés automatiquement à partir des images aériennes et terrestres enrichis des textures terrestres suffiront à représenter une grande partie de la ville. Toutefois, les édifices et sites remarquables, qu'ils soient archéologiques, architecturaux ou autres, seront sans doute les entités de prestige de ces futures bases de données 3D et seront, par conséquent, modélisés avec une grande finesse tout en étant représentés de manière compacte. La photogrammétrie terrestre, technique, quoique très bien adaptée à ce type de levés et très bien maîtrisée à l'IGN, est restée très marginalement utilisée en raison de la lourdeur de la restitution manuelle et, par conséquent, de son coût prohibitif.

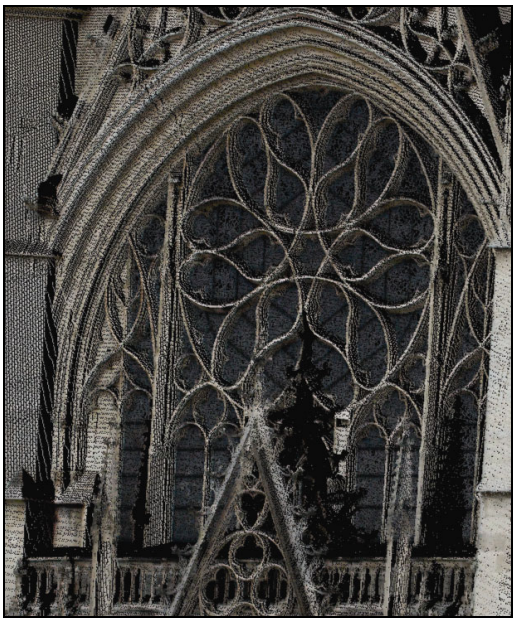
L'automatisation de la restitution photogrammétrique paraissant, à court et moyen terme, difficile (le problème étant encore plus difficile qu'en aérien), nous nous donnons les moyens, par l'utilisation et la segmentation conjointe d'images et de nuages de points 3D issus d'un système LASER à balayage terrestre, d'alléger grandement l'intervention manuelle dans la modélisation « tel que construit » de l'édifice.

1



2

3



4

figure B.2.8

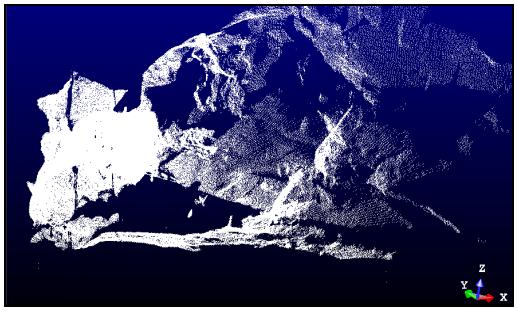
1. *Image d'un appareil photo numérique.*
2. *Vue du nuage de points LASER (réalisé avec le scanner GS100 de la société* IGN*) coloré avec les coefficients de rétro-diffusion.*
3. *Nuage de points LASER texturé avec l'image numérique géoréférencée relativement au LASER avec un algorithme ad-hoc* [DEVEAU & al 04]*.*
4. *Zoom sur le nuage 3D texturé.*

SPÉLÉOPOLIS : reconstruction 3D photo-réaliste d'environnements complexes

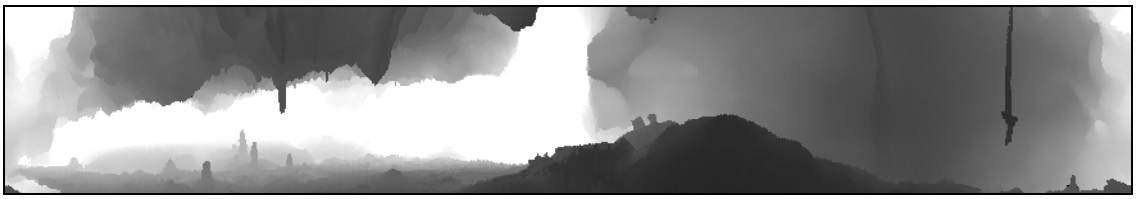
SPÉLÉOPOLIS vise la modélisation photo-réaliste d'environnements très complexes. Son champ d'application premier est la constitution de *fac-similés* numériques géométriquement et radiométriquement fidèles de grottes ornées à des fins scientifiques (compréhension de la disposition relative des peintures, suivi de l'évolution des peintures, etc.) et à des fins de visite virtuelle pour le public.

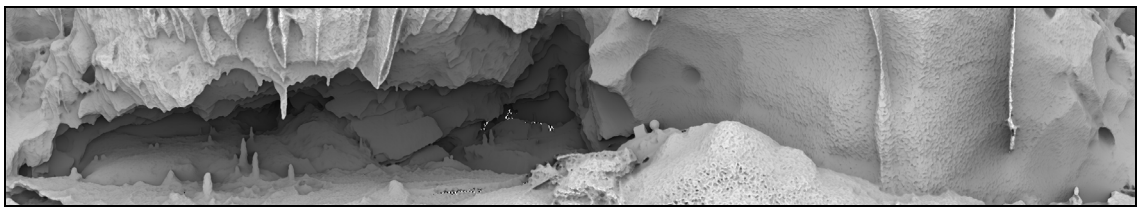
Il adresse, à la fois, la mise au point de systèmes et de méthodologie d'acquisition couplée LASER/image et la mise au point de méthodologies de traitement permettant une modélisation automatisée et très précise (millimétrique) de la volumétrie par mélange optimal de mesures LASER et photogrammétriques.

figure B.2.9

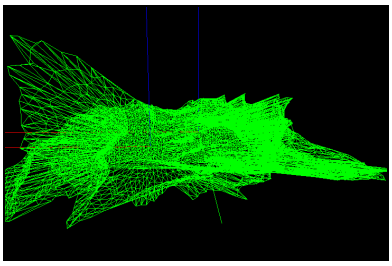
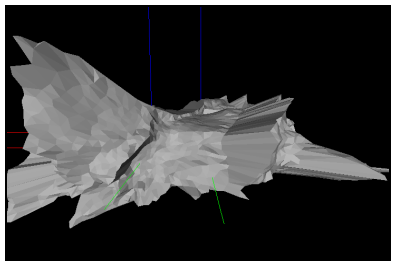
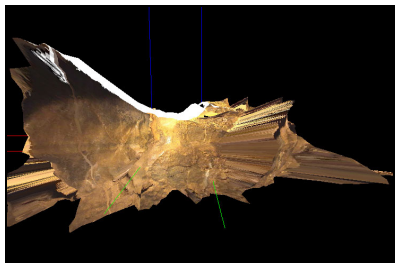
1  2

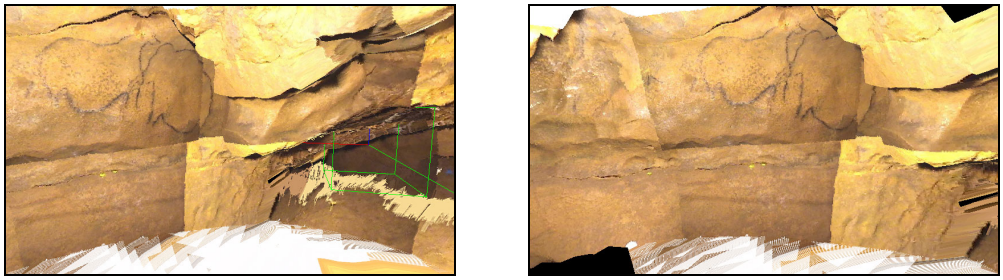
1. *Laser à balayage terrestre GS 100 de la société* MENSI.
2. *Nuage de points 3D acquis par le Laser dans une salle de la grotte Mayenne-Sciences.*

3 

4 

3. *Image de distance correspondante en géométrie sphérique.*
4. *Image de distance éclairée de manière diffuse.*

5   

6 

5. *Vues 3D filaire, pleine et texturée de l'extérieur de la salle 3 de la grotte Mayenne-Sciences.*
6. *Vues 3D texturées de l'intérieur de la salle 3 avec fresque mammouth et bison.*

Publications

[BENTRAH 04a] O. Bentrah, N. Paparoditis and M. Pierrot Deseilligny : *Stereopolis : an image-based urban environment modeling system*, dans Mobile Mapping Technology 2004, 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Kumming (China), laboratoire MATIS, IGN-SR-04-002-C-COM-OB, mars 2004.

[BENTRAH 04b] O. Bentrah, N. Paparoditis, M. Pierrot Deseilligny and R. Horaud : *Estimating sensor pose from images of a stereo rig*, dans actes IAPRS, Congrès ISPRS, Istanbul (Turquie), laboratoire MATIS, IGN-SR-04-003-C-COM-OB, juillet 2004.

[DEVEAU et al 04] M. Deveau, M. Pierrot Deseilligny, N. Paparoditis and X. Chen : *Relative laser scanner and image pose estimation using points and segments*, dans actes IAPRS, Congrès ISPRS, Istanbul (Turquie), IGN-SR-04-004-C-COM-MD, juillet 2004.

[JUNG, BOLDO 04] F. Jung and D. Boldo : *Bundle adjustment and Incidence of linear features on the accuracy of external calibration parameters*, dans actes IAPRS, Congrès ISPRS, Istanbul (Turquie), IGN-SR-04-005-C-COM-FJ, juillet 2004.

[PAPARODITIS 03] N. Paparoditis : *Modélisation 3D des environnements urbains*, Revue Géomètre n°10, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-010-C-ART-NP, octobre 2003.

[PAPARODITIS et al 03] N. Paparoditis, M. Deveau and J.-P. Rivière : *Integrating technologies and techniques to automate surveys,* dans actes CD Rom de la 3rd Dimension Conference, Ed. MENSI, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-035-C-COM-NP, octobre 2003.

[TOURNAIRE 04] O. Tournaire : *Reconstruction 3D multi-vues de passages piétons à partir d'images aériennes »,* rapport d'avancement de thèse, laboratoire MATIS, IGN-SR-04-008-C-RAP-OT, 2004.

B.3 Interprétation de scènes urbaines à partir d'images satellitaires THR : reconstruction de facettes 3D et optimisation globale 3D

Nesrine Chehata

Contexte

Le lancement des satellitaires commerciaux (Ikonos, Eros, QuickBird), permet de nos jours de disposer d'images satellitaires de résolution submétrique de l'ordre de [60 cm, 1 m]. Ces nouvelles données ont relancé les recherches scientifiques sur la reconstruction 3D des bâtiments et l'extraction des routes à partir d'images satellitaires THR, Très Haute Résolution. Cette étude fait partie d'un projet global, en collaboration avec le CNES, d'interprétation de scènes urbaines à partir d'images satellitaires très haute résolution pour les thèmes bâti et routier. Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse au thème bâti, le réseau routier apporte essentiellement une information de focalisation sur les bâtiments.

On dispose en entrée de couples stéréoscopiques panchromatiques à [45-70 cm] de résolution et de faible rapport Base sur Hauteur B/H [0,05-0,2].

Dans les années 80/90, plusieurs travaux ont traité le problème de la reconstruction de bâti à partir d'images aériennes. La résolution des images aériennes était équivalente à celles des images satellitaires submétriques aujourd'hui mais les conditions de prise de vues diffèrent entre les deux contextes. Dans le contexte satellitaire THR actuel, peu de travaux traitent le thème de reconstruction de bâti. Dans [FRASER 01], l'auteur présente des évaluations qualitatives et quantitatives sur des images IKONOS concernant les aspects radiométriques et les précisions de reconstruction de bâti avec des méthodes existantes. Dans [SOHN 01], l'auteur propose une méthode de détection des bâtiments en 2D à partir d'images satellitaires en recherchant les directions dominantes par analyse de Fourier.

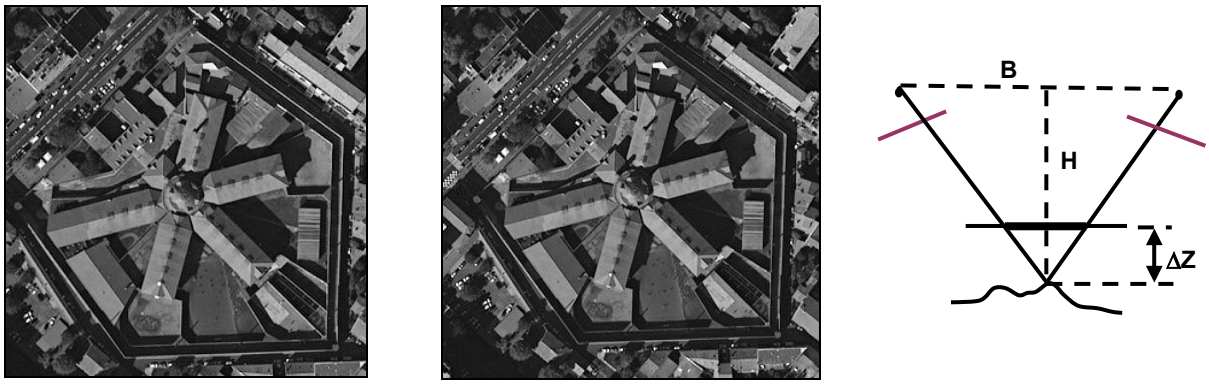


figure B.3.1 *: couple stéréoscopique simulation PLEIADES - Toulouse 60 cm, B/H = 0,08*

Objectifs

Le but de cette étude est l'interprétation de scènes urbaines et la reconstruction de bâtiments en 3D à partir d'images satellitaires THR. L'étude porte sur l'évaluation de la reconstruction 3D (précision altimétrique, exhaustivité, robustesse …), à partir des images des futurs satellitaires PLEIADE HR, successeurs de SPOT-5.

Notre objectif est de proposer un système automatique de reconstruction de bâti en contexte satellitaire. Les limitations prévisibles par rapport aux données d'entrée sont principalement liées à la stéréoscopie simple et au faible rapport B/H des couples qui est le paramètre critique dans notre cas. En effet, la précision altimétrique de reconstruction sera dégradée avec de faibles rapports B/H pour les couples stéréoscopiques. Par exemple, considérons le couple de la figure B.3.1, ci-dessous, une erreur de localisation d'un pixel sur l'image engendre une imprécision altimétrique de l'ordre de 7,5 m. Par contre, avec un faible rapport B/H, les deux images présentent de faibles distorsions géométriques et des parties cachées réduites, ce qui rend leur appariement plus fiable. Les algorithmes devront tirer profit de cet avantage. Une évaluation est prévue, en fonction de différents rapports B/H.

Étant donnée la complexité d'une extraction fine et détaillée des toits en milieu urbain dense à partir des données dont on dispose en entrée, on propose de fournir plusieurs niveaux de description des bâtiments. En effet, le but sera de combiner les informations fiables extraites qui se trouvent nécessairement à plusieurs niveaux de description (points 3D, segments 3D, plans 3D). On obtient ainsi une description de la scène permettant d'exploiter à chaque endroit, les primitives du niveau le plus élevé que l'on a pu reconstruire de manière fiable.

On aboutit par conséquent à un modèle de surface plus enrichi qu'un simple MNE raster, un MNE « hybride » : raster/vecteur (voir figure B.3.2) qui combine la grille régulière correspondant au MNE initial et l'information vectorielle correspondant aux primitives 3D fiables extraites.

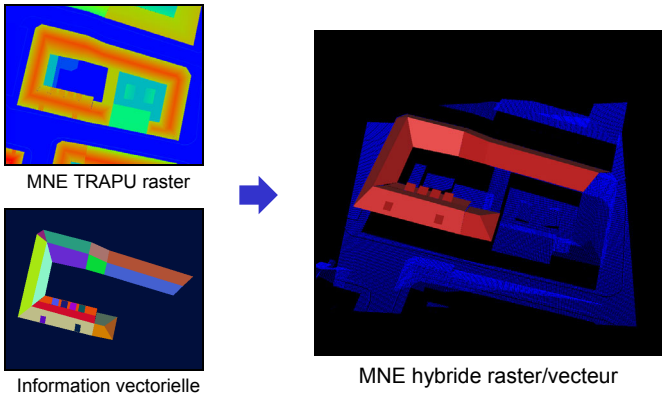


figure B.3.2 *: MNE hybride raster/vecteur*

Stratégie globale

Une stratégie ascendante a été choisie. Elle est basée sur l'extraction de primitives 3D fiables (segments 3D, surfaces planes) à partir des images ou bien d'un MNE (Modèle Numérique d'Élévation) généré à partir des images. Les primitives 3D extraites seront éventuellement recalées finement *a posteriori* pour améliorer la précision de la reconstruction. Ensuite une étape d'optimisation globale en 3D sera réalisée afin d'obtenir des MNE hybrides. Cette étape a pour but d'exploiter au mieux l'information 3D extraite. Les facettes 3D, les segments 3D pour les discontinuités, les données sources pour utiliser le MNE initial à défaut d'information vectorielle et des données externes comme le réseau routier pour la modélisation du sol et la délimitation des bords de bâtiments.

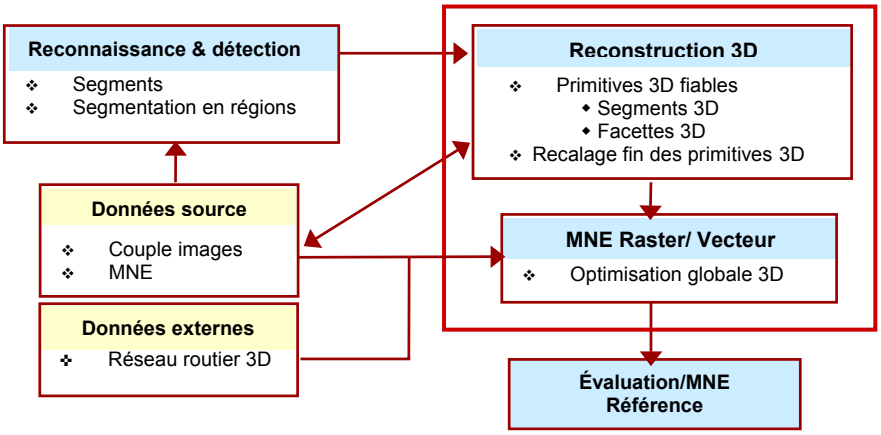


figure B.3.3 *: stratégie globale*

Le développement d'une plate-forme d'évaluation des MNE obtenus est prévu à la fin du processus. L'évaluation des MNE générés par rapport à un MNE de référence traduira la régularité des surfaces générées, l'exhaustivité et la précision de la reconstruction, etc. Pour l'extraction de primitives 3D, un premier travail a été réalisé pour l'extraction de segments 3D [CHEHATA 02]. On s'intéresse dans cet article à la reconstruction de facettes 3D et à l'optimisation globale hybride.

Détection et reconstruction de facettes 3D par approche hiérarchique par régions

État de l'art

De nombreux auteurs ont montré l'importance des surfaces planes pour décrire les scènes urbaines [VESTRI 01]. Certains travaux proposent d'extraire des plans 3D à partir de nuages de points 3D obtenus par focalisation sur un MNE, par exemple : en utilisant la transformée de Hough 3D pour extraire des hypothèses de plans 3D [JIBRINI 02]. Dans [BAILLARD 99], on recherche des demi-plans 3D pivotant autour des segments 3D extraits.

D'autres approches sont basées sur une segmentation en régions à partir des images ou du MNE [VESTRI 01] ou bien utilisant le MNE et une ortho-image de gradients [TAILLANDIER 03]. D'autres travaux consistent à rechercher des rectangles à partir des images [NORONHA 01] ou du MNE par des processus stochastiques [ORTNER 03] ou bien en combinant le MNE avec des ortho-images [VINSON 02]. Les rectangles délimitent les bâtiments, la reconstruction 3D est obtenue en modélisant les toits par des modèles plus ou moins complexes et en récupérant les altitudes moyennes à partir du MNE.

Méthodologie

Pour la reconstruction de facettes 3D, deux approches ont été développées. Une approche basée sur les segments 3D [CHEHATA 02] où les plans 3D sont estimés en recherchant des demi-plans pivotant autour des segments 3D extraits, la délimitation des facettes 3D est réalisée par relaxation probabiliste. La deuxième approche est une approche hiérarchique par régions que l'on va détailler dans ce qui suit.

L'approche par régions est basée sur la segmentation des images et la mise en correspondance des régions obtenues. Cette approche a été choisie, tout d'abord, parce que les régions constituent des primitives plus fiables que les segments. En effet, leurs tailles étant plus grandes que la vignette de corrélation, les appariements sont plus fiables. Ceci permet d'effectuer des estimations robustes des plans 3D et de corriger ainsi l'imprécision altimétrique due au faible rapport B/H. En outre, cette approche permet de reconstruire directement des surfaces tridimensionnelles, ce qui fournit un modèle 3D beaucoup plus dense que ceux obtenus à partir d'une analyse en points caractéristiques ou en segments des deux images de la scène. En outre, la segmentation en régions apporte une information topologique qui permet de propager certaines contraintes entre régions adjacentes et donc de mieux structurer la scène 3D. Enfin, le faible rapport B/H du couple stéréoscopique présente l'avantage de réduire les distorsions géométriques entre les images ainsi que le problème des parties cachées, ce qui facilitera l'appariement des régions entre les deux images.

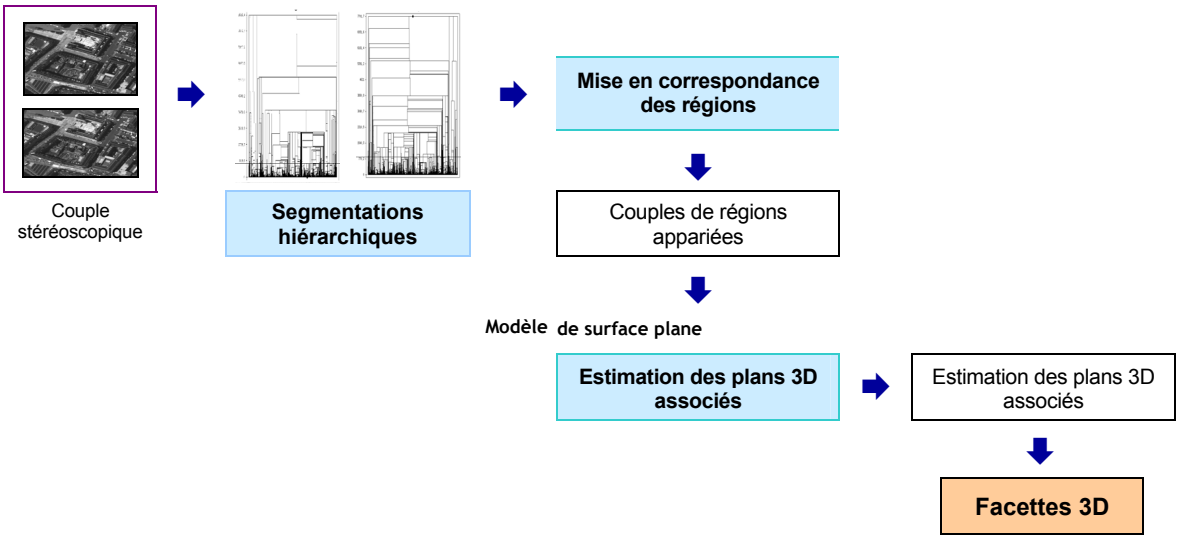


figure B.6.4 *: schéma global de la reconstruction de facettes 3D par approche région*

L'approche globale est illustrée dans la figure B.3.4. Trois grandes parties se détachent : la segmentation des images, l'appariement des régions et la reconstruction des facettes 3D.

Tout d'abord, les deux images sont segmentées par des outils de segmentation multi-échelles que l'on décrira dans la première partie. La deuxième phase est la mise en correspondance des régions dans les deux images. On obtient ainsi des couples de régions appariées. En supposant un modèle de surface plane, on cherche à reconstruire les plans 3D correspondant aux couples de régions appariées et les facettes 3D finales sont obtenues par projection des contours des régions sur les plans 3D correspondants.

Segmentation multi-échelles et hiérarchie

Dans notre approche, le but de la segmentation des images est d'obtenir des partitions en régions denses qui renvoient des primitives 2D interprétables, en vue de les apparier pour définir des facettes. Il est toujours difficile voire impossible de segmenter de façon bi-univoque deux images en vue de les apparier.

Pour pallier ce problème, on propose d'utiliser la segmentation hiérarchique [GUIGUES 03] qui permet d'avoir plusieurs niveaux d'interprétation de la scène (pixel, toit, bâtiment …), allant des régions les plus fines aux régions les plus grossières. Les appariements peuvent ainsi s'effectuer entre plusieurs niveaux afin d'obtenir les meilleures segmentations appariées dans les deux images.

Dans notre approche, compte tenu du faible rapport B/H du couple, les distorsions géométriques et les parties cachées entre les deux images sont réduites. Par conséquent, les deux segmentations sont assez similaires, ce qui facilitera l'appariement des régions par la suite.

On commence tout d'abord par segmenter les images par un algorithme de segmentation multi-échelle, décrit dans [GUIGUES 03]. Cet algorithme produit des segmentations de l'image $\Omega_0, \Omega_1, \ldots \Omega_n$ par une approche ascendante ou encore "Bottom-Up". En partant d'une sur-segmentation initiale (par l'algorithme de partage des eaux), la hiérarchie de régions est construite par fusions successives des régions initiales suivant le modèle décrit ci-dessous.

Modèle de fusion des régions

Le but est de segmenter l'image en régions correspondant à de véritables facettes 2D donc principalement des toits dans notre cas. Ces régions sont en général de forme simple et de radiométrie homogène. Pour cela, on part d'une formulation classique de la segmentation dans laquelle deux énergies sont mises en compétition : une énergie géométrique et une énergie radiométrique. L'objectif étant de trouver la partition qui minimise l'énergie globale pour un λ donné.

$$E_\lambda(P) = \sum_{R \in P} E_\lambda(R) = \sum_{R \in P} \lambda\, E_{Géo}(R) + E_{Rad}(R)$$

λ est un terme de régularisation : pour un fort λ l'énergie géométrique sera prédominante conduisant à un modèle simple (peu de régions avec des formes simples), alors que si λ est faible on s'attache plus à l'énergie radiométrique et on obtient donc de plus petites régions homogènes vérifiant le modèle radiométrique. En outre, les deux énergies géométrique et radiométrique sont elles-mêmes composées d'une énergie de régularisation (modèle), C, et une énergie d'attache aux données, D :

$$E_{Géo}(R) = W_G\, C_{Géo}(R) + D_{Géo}(R)\ ;$$
$$E_{Géo}(R) = W_R\, C_{Rad}(R) + D_{Rad}(R).$$

W_G et W_R constituent des termes de régularisation des deux énergies respectives. En pratique, on utilise comme modèle géométrique un coût linéaire en fonction du gradient de l'image. Pour le modèle radiométrique, on utilise un codage MDL (Minimum Description Length) de Gaussienne [KANUNGO 95].

Au niveau pratique, l'idée est de construire une hiérarchie de régions d'une image à différentes échelles en augmentant à chaque fois l'échelle globale λ et en fusionnant pour cela les régions adjacentes dont la fusion diminue l'énergie globale. La figure B.3.5, montre un exemple de hiérarchie. La hiérarchie est un arbre dont les caractéristiques sont les suivantes :

- les feuilles sont les nœuds de base obtenus par sur-segmentation de l'image, la racine (i.e. le sommet) est l'image entière ;
- suite au processus de fusion, les régions sont de plus en plus grandes de bas en haut ;
- une coupe horizontale suivant λ fournit une partition de l'image [GUIGUES 03], voir figure B.3.5.

Comme le montre la figure B.3.5, à chaque valeur de λ, correspond une partition de l'image en régions. Plus λ est élevé, plus les régions sont grandes et la description de la scène est grossière. Plus λ est faible, plus les petites régions homogènes sont favorisées.

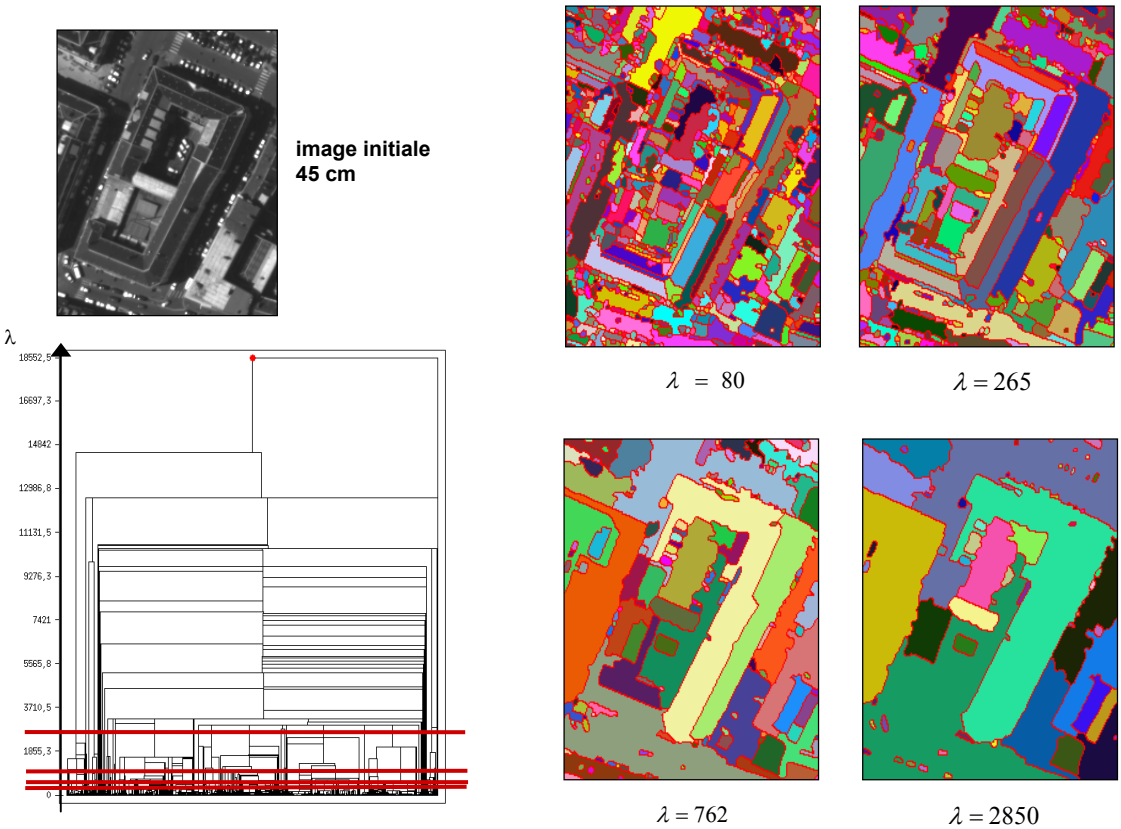


figure B.6.5 *: Exemple de segmentation hiérarchique*

Mise en correspondance des régions

La mise en correspondance des régions a pour but d'apparier globalement les deux hiérarchies et est composée de trois étapes (cf. figure B.3.6). La première étape consiste à apparier au mieux les régions de chaque hiérarchie avec la seconde hiérarchie. On disposera ainsi de correspondances 1 à N, le but étant de toujours avoir, pour une région appariée, le bon homologue parmi la liste d'homologues possibles.

La deuxième étape sera la qualification des appariements en affectant une qualité à chaque couple de régions. Le but final sera de trouver les meilleures coupes dans les deux hiérarchies qui renvoient des régions correspondant à de véritables facettes 3D et qui soient appariées entre elles. Les coupes seront réalisées en combinant les qualités d'appariement et la contrainte de planéité des régions.

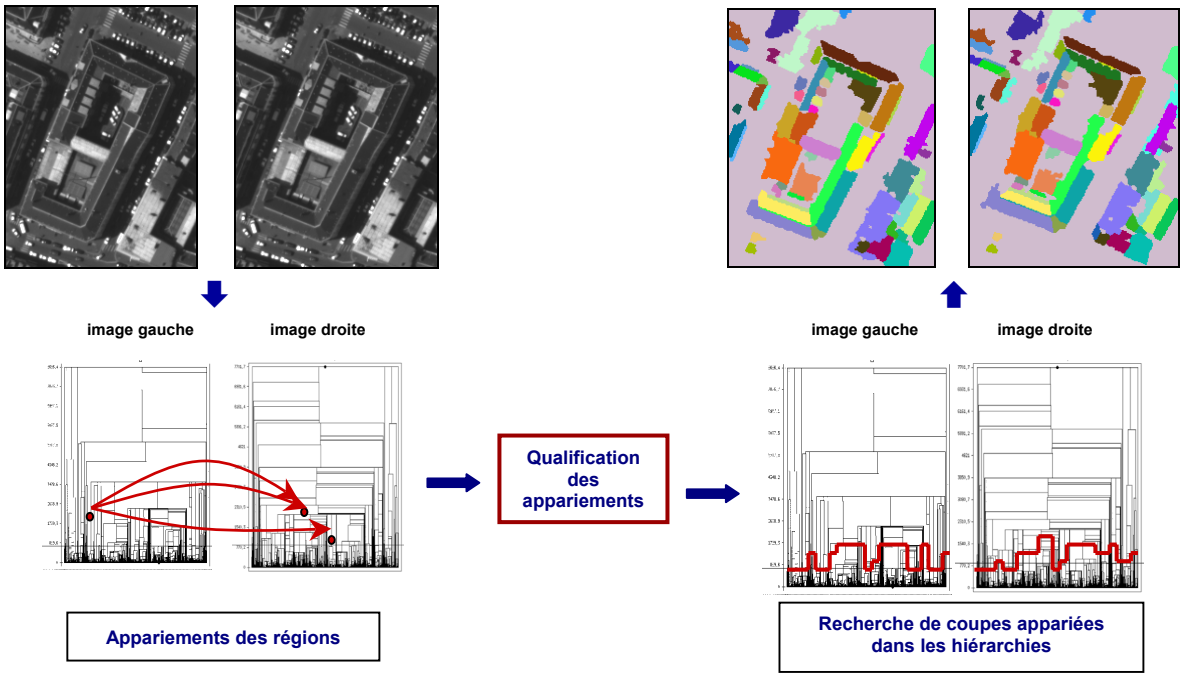


figure B.3.6 *: mise en correspondance des régions et détection des facettes 2D*

Appariement d'une région

Dans un premier temps, les régions d'une hiérarchie sont appariées indépendamment les unes des autres avec les régions de la seconde pyramide. Le processus est réalisé sur les deux pyramides de façon symétrique. L'appariement de régions est un problème classique en vision [SVCG 89]. Pour cette étape d'appariement, on utilise plusieurs contraintes pour réduire le nombre d'homologues à traiter : contrainte de taille, contraintes épipolaire, altimétrique, contraintes de similarité, de recouvrement. Ces contraintes sont détaillées dans ce qui suit. L'originalité de notre approche réside dans la propagation ascendante des contraintes d'appariement dans les hiérarchies. Ceci rend la recherche d'homologues plus robuste.

Contrainte de taille

Cette contrainte est utilisée tout au long du processus pour éviter de traiter des régions jugées trop petites ou trop grandes. En fonction du niveau d'interprétation souhaité (toit, cheminées, chiens assis ...) et de la résolution de l'image, on impose un seuil minimal et maximal pour la taille des régions, S^t_{min} et S^t_{max}.

Contrainte épipolaire et altimétrique

Pour rechercher la liste d'homologues possibles pour une région donnée, on commence par appliquer la contrainte épipolaire sur le barycentre G de la région (voir figure B.3.7, page suivante). Il faut que le barycentre de la région homologue appartienne à un bandeau épipolaire obtenu avec une tolérance préfixée par rapport à la ligne épipolaire correspondante à G qu'on notera E_G. L'ensemble des régions homologues, d'une région donnée R, par la contrainte épipolaire sera noté $HEpi(R)$.

Comme le montre la figure B.3.7, afin de réduire l'espace de recherche, on utilise également une contrainte sur les altitudes Min et Max de la région. On dispose en entrée d'un Modèle Numérique d'Élévation (obtenu par des techniques de corrélation) [BAILLARD 97] en $2D^{1/2}$ où la valeur de chaque pixel renvoie son altitude sur le terrain. Le MNE obtenu n'est pas précis à cause du faible B/H mais robuste. Par conséquent, grâce à un volume dilaté du MNE, on dispose d'une bande de tolérance qui renvoie l'altitude Min et Max de chaque pixel. Cette bande de tolérance permettra de restreindre l'espace de recherche. La recherche des homologues épipolaires d'une région revient ainsi à retenir tous les nœuds de la seconde hiérarchie dont les barycentres sont contenus dans un rectangle épipolaire.

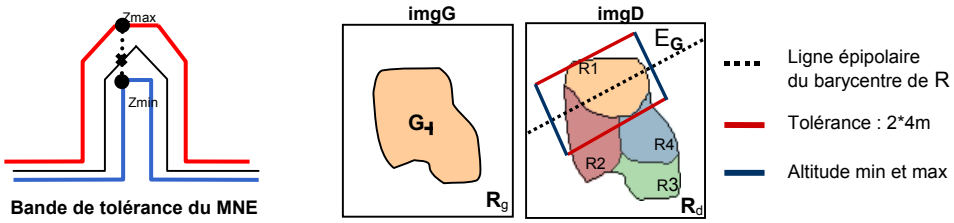


figure B.3.7 *: contrainte épipolaire et altimétrique*

Dans le cas d'un barycentre excentré ou d'une sur-segmentation de la région dans l'une des images, on risque de perdre des régions homologues. Pour éviter ces problèmes, la contrainte épipolaire sera appliquée sur les nœuds de base de la hiérarchie et propagée de bas en haut de façon itérative. Un nœud-père est considéré comme homologue d'un nœud de référence par la contrainte épipolaire si tous ses fils vérifient cette propriété. On évite ainsi, d'une part, de perdre des régions homologues et, d'autre part, de traiter les régions parasites dues au bruit, qui se rajoutent en cours de fusion et qui n'appartiennent pas au départ à la région de référence.

Contrainte de similarité

À ce niveau, chaque région R a une liste d'homologues $HEpi(R)$ dans la seconde hiérarchie. Pour réduire la combinatoire, on utilise une contrainte de similarité [SVCG89]. L'ensemble des régions homologues de R par la contrainte de similarité sera noté $HSim(R)$.

$$S_p(R_g,R_d)=1-\frac{\min(A_p(R_g),A_p(R_d))}{\max(A_p(R_g),A_p(R_d))} \qquad et \qquad Sim(R_g,R_d)=\sum_{p=1}^{q} w_p\, s_p(R_g,R_d)$$

S_p est le score de similarité pour chaque paramètre ou attribut A_p de la région. W_p est le poids affecté à chaque attribut. Si les attributs de deux régions sont similaires, le score tend vers 0. Dans notre cas, trois attributs sont utilisés : la surface, les dimensions du rectangle englobant et le moment spatial d'ordre 2. Le score de similarité doit être supérieur à un seuil préfixé S^s = 0,3. Ce seuil est large pour éviter de perdre des régions homologues.

Contrainte de recouvrement

Le principe de la contrainte de recouvrement est illustré figure B.3.8. On commence par estimer le plan $\pi(R_g,R_d)$ correspondant au couple de régions appariées. La phase de reconstruction du plan 3D sera détaillée ultérieurement.

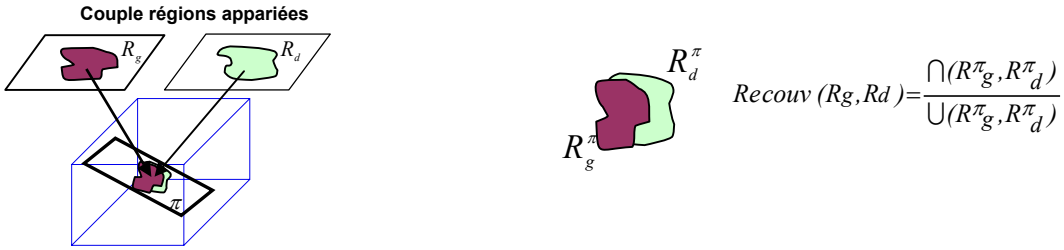


figure B.3.8 *: contrainte de recouvrement*

En projetant les deux régions sur le plan, on obtient deux régions rectifiées R^π_g et R^π_d. Le recouvrement est égal au rapport de l'intersection des deux régions rectifiées sur leur union. Pour valider l'appariement, il faut que le recouvrement des deux régions projetées soit supérieur à un seuil S^r. Ce seuil est plus facile à interpréter que le seuil de similarité puisqu'il ne dépend pas des segmentations. On choisit un seuil strict S^r = 60%.

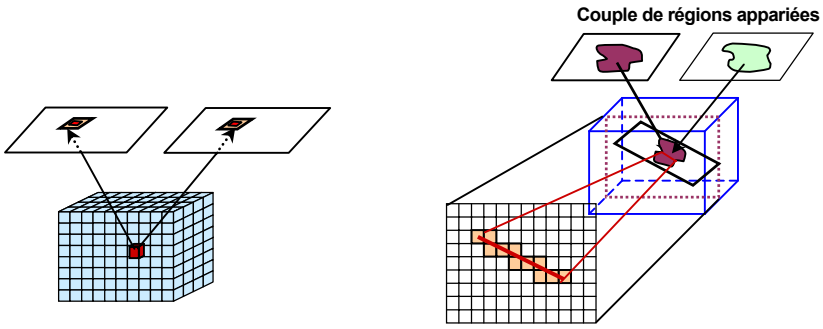
Les régions homologues d'une région donnée doivent ainsi vérifier la contrainte de taille, la contrainte épipolaire, les contraintes de similarité et de recouvrement.

Qualification des appariements

Chaque appariement est qualifié par le score de corrélation des deux régions appariées. On utilise pour cela un volume de corrélation dans l'espace objet.

Volume de corrélation

Le volume de corrélation (voir figure B.3.9-a) est calculé dans l'espace objet, en coordonnées géographiques [PAPARODITIS 00]. L'emprise planimétrique de ce volume correspond à la zone de recouvrement du couple stéréoscopique. On estime ensuite un intervalle d'altitude en utilisant un modèle numérique d'élévation (MNE) calculé sur le couple d'images. Une fois le volume délimité, on attribue à chacun de ses voxels un score d'attache aux données quantifiant l'appartenance de ce voxel à la scène 3D que l'on cherche à reconstruire. Pour cela, on projette le voxel et ses voisins horizontaux sur une fenêtre de taille fixée dans les images. La ressemblance des imagettes est mesurée par le coefficient de corrélation normalisé centré. En pratique, la taille de la fenêtre est 3 x 3.



B.3.9-a - calcul du cube de corrélation

B.3.9-b - calcul du score d'une facette 3D

figure B.3.9 *: cube de corrélation*

Reconstruction des plans 3D à partir de deux régions appariées

La reconstruction du plan 3D d'un couple de régions appariées est indispensable pour calculer le recouvrement des régions, pour qualifier la qualité de l'appariement et bien sûr pour la reconstruction finale de la scène 3D.

La reconstruction des plans 3D se fera à partir du MNE. En effet, on dispose en entrée d'un MNE non précis mais robuste. Une fois que la délimitation des régions a été obtenue à partir des images, on peut estimer le plan 3D correspondant de manière robuste à partir du MNE. Pour cela, on projette les deux régions sur le MNE et on garde les points 3D en commun correspondants. Une estimation robuste par les M-estimateurs $L_{1.2}$ permet de calculer l'équation du plan sous la forme $z = ax + by + d$.

Qualification de l'appariement de deux régions

Un couple de régions appariées est qualifié par le score de corrélation moyen de la facette 3D correspondante. En effet, après la reconstruction du plan $\pi(R_g,R_d)$, on projette les deux régions R_g et R_d sur le plan 3D. L'intersection des deux régions projetées renvoie la délimitation de la facette 3D que l'on note $F(R_g,R_d)$. La facette est validée si et seulement si elle appartient à une bande de tolérance autour du MNE. Par la suite, chacun des voxels de la facette 3D a le score de corrélation correspondant dans le cube pré-calculé (voir figure B.3.9-b). La moyenne de tous les voxels de la facette renvoie le score de corrélation qui qualifie l'appariement.

$$Q(R_g, R_d) = \frac{\sum_{V \in F} ScoreCorrel(V)}{Card(F(R_g, R_d))}$$

$F(R_g,R_d)$ étant considérée comme un ensemble de voxels V.

L'avantage d'utiliser le cube de corrélation est le gain de temps puisqu'on calcule les scores de corrélation une seule fois pour tous les voxels du cube. Cette méthode donne de bons résultats avec des faibles B/H puisqu'il n'y a pas beaucoup de distorsions entre les images. En effet, dans notre contexte, les vignettes horizontales suffisent pour qualifier les appariements. On n'a pas besoin de rectifier les régions sur leurs plans correspondants pour les corréler dans l'espace-objet, d'où un gain de temps important.

Recherche de la coupe optimale dans une hiérarchie

En fonction des scores d'appariement, on cherche, d'une part, deux coupes dans les deux hiérarchies qui permettent d'avoir la meilleure segmentation de la scène, c'est-à-dire des régions qui correspondent aux toits de bâtiments. Il faut, d'autre part, que les régions des deux coupes soient appariées entre elles.

Le calcul de la coupe optimale est détaillé dans ce qui suit pour une hiérarchie. En pratique, le processus est appliqué aux deux hiérarchies afin de traiter le couple de façon symétrique et d'obtenir des appariements plus fiables. Contrairement à la segmentation, la recherche de la coupe optimale se fait par une approche descendante. Les appariements sont en effet plus fiables sur des grandes régions, on commence donc par le niveau le plus grossier en descendant vers le bas.

On définit pour chaque région R, une qualité $Q(R)$ qui qualifie l'ensemble de ses appariements et qui correspond au maximum des scores de corrélation renvoyés avec l'ensemble de ses régions homologues. On réalise la coupe à un niveau donné si les deux conditions suivantes sont réalisées.

- $Q(R) \geq Q(R_f) \quad \forall R_f \in Fils(R)$
- $e\left(\perp\pi_f^i, \perp\pi_f^j\right) < \varepsilon \quad \pi_f \in \Pi\left(R_f, \forall R_f \in Fils(R)\right)$

avec :

- $\perp \pi_f^i$ la normale au plan π^i de la région ;
- $e\,(\perp \pi_f^i, \perp \pi_f^i)$ est l'écart angulaire entre les normales des plans pour comparer leurs pentes respectives.

La première condition traduit le fait que la qualité de la région-mère soit supérieure ou égale à celles de tous ses fils. La seconde condition traduit le fait que les plans 3D correspondant aux fils de la région R soient quasi-coplanaires.

Le choix d'un seuil sur la qualité des appariements d'une région étant critique, la coupe se fait par un critère relatif où l'on compare la qualité d'une région par rapport à celles de ses fils. Si la région-mère a une meilleure qualité que tous ses fils, il faut vérifier que les fils renvoient des plans quasi-coplanaires, ce qui veut dire qu'ils constituent une sur-segmentation du toit et qu'il faut s'arrêter au niveau de la région-mère.

Résultats de coupes optimales

La figure B.3.10 montre les résultats de l'appariement global sur un couple d'images de Toulouse à 60 cm avec un faible rapport B/H de 0,08. Afin de se focaliser sur les bâtiments, une classification préliminaire sol/sursol a été effectuée sur les images pour éliminer les régions du sol. Les premiers résultats sont satisfaisants, les principaux toits sont présents et la scène est bien caricaturée. On remarque cependant que la scène n'est pas dense et que des fausses régions apparaissent appartenant au sol. Ces régions seront éliminées *a posteriori* en modélisant le sol grâce au réseau routier.

image gauche 60 cm | image gauche segmentée | image droite segmentée

figure B.3.10 *: segmentations appariées du couple d'images Toulouse 60 cm, B/H 0,08*

Évaluations

Le tableau B.3.1, page suivante, montre que 75% des régions retenues correspondent à de véritables toits de bâtiments. Les toits manquants sont estimés à 14%. Pour résoudre le problème de perte de régions, on peut propager les appariements par adjacence de régions afin d'obtenir des coupes denses par la suite. On peut aussi intervenir au niveau de la reconstruction finale, en récupérant des altitudes médianes à partir du MNE ou bien introduire des modèles de toits tel que les toits symétriques, par exemple.

Au moment du passage en 3D des facettes, des problèmes de délimitation de facettes apparaissent. Des facettes jointives en 2D ne le sont plus forcément en 3D en partie à cause du faible rapport B/H. La non-densité de la segmentation de la scène et la mauvaise délimitation des facettes en 3D nécessitent une optimisation globale en 3D pour caricaturer au mieux le bâtiment.

tableau B.3.1 *: évaluation des coupes obtenues*

Régions planes valides	Régions planes manquantes
75%	14%

Optimisation globale en 3D

On propose dans cette partie, un algorithme d'optimisation globale de la scène en 3D en intégrant l'information des facettes 3D extraites précédemment, d'autres types de primitives 3D comme les segments 3D et des données externes, dans notre cas, ce sera le réseau routier 3D (BD TOPO Routier). On cherche à obtenir en sortie un MNE dense de la scène, un MNE hybride raster/vecteur où l'on utilise au mieux l'information vectorielle 3D extraite. La méthode choisie est à base de flots de graphes. Roy et Cox [ROY, COX 98] montrent qu'une coupe minimale dans le cube de corrélation renvoie une carte de disparité.

Formulation du problème par flot maximal

On considère un graphe pondéré $G=<v,\varepsilon>$ avec deux nœuds terminaux $\{s,t\}$ la source et le puits. Une coupe $C=(v^s, v^t)$ est une partition des nœuds en deux ensembles tels que $s \in v^s$ et $t \in v^t$. La capacité d'une coupe, notée |C| est égale à la somme des poids des arêtes coupées et qui séparent v^s et v^t. Le problème de coupe minimale consiste à trouver la coupe de capacité minimale dans le graphe *G*. Ce problème peut être résolu en calculant le flot maximal entre la source et le puits [FORD, FULKERSON 62]. On a alors la relation suivante entre le flot maximal atteint sur l'ensemble des fonctions de flots valides et la coupe de capacité minimale.

$$max\,Flot(G)=min\left|C\right|$$

Ce qui revient à dire qu'une recherche de flot maximal correspond à une coupe de capacité minimale.

Construction du graphe

Cette optimisation sera réalisée à l'intérieur du cube de corrélation pré-calculé. Les nœuds du graphe sont les voxels du cube. Les capacités des arêtes sont exprimées en fonction des scores de corrélation. Plus le score de corrélation est fort, plus les voxels sont fiables et plus la capacité est minimale. On définit le coût d'une nœud *u*.

$$Coût(u)=100*(1-Corr(u))$$

avec :

- $Corr(u)$, le coefficient de corrélation normalisé de *u*.

$$\begin{cases} C_{disp}(u,v)=\dfrac{Coût\ (u)+Coût\ (v)}{2} \\ C_{occ}(u,v)=k\ c_{disp}(u,v)+Cste \end{cases}$$

avec :

- u et v, deux nœuds quelconques du graphe ;
- $C_{disp}(u,v)$, étant la capacité d'une arête verticale (capacité de disparité) ;
- $C_{occ}(u,v)$, étant la capacité d'une arête horizontale (capacité d'occlusion) ;
- k, étant un coefficient de lissage.

Les capacités sont étalées entre 0 et 100.

k est un paramètre qui permet de régler le lissage de la surface finale. Plus *k* est grand, plus les discontinuités sont pénalisées. En effet, la capacité C_{occ} augmente, on favorise ainsi la coupe par les arêtes verticales dont le coût est moins élevé ce qui conduit à des chemins horizontaux qui rendent la surface finale plus régulière et pénalisent ainsi les discontinuités.

En pratique

La figure B.3.11 illustre le processus d'optimisation Roy et Cox [ROY, COX 98] avec utilisation de facettes 3D fiables. Le graphe est illustré en 2D. Le graphe est initialisé avec les scores de corrélation du cube initial.

Les facettes 3D sont projetées dans le cube et discrétisées. Les voxels correspondants sont affectés du score de corrélation moyen de la facette. Le passage du flot est autorisé sur les contours des facettes 3D, par contre il est interdit au-dessus et en dessous des facettes 3D. Ainsi, si on dispose d'information vectorielle, on l'exploite et on force le flot à passer par les facettes détectées sinon la coupe est réalisée sur les voxels aux scores de corrélation initiaux.

On peut remarquer sur la figure B.3.11, deux cas particuliers. Tout d'abord le cas où la facette 3D est fragmentée : l'algorithme optimise au mieux avec les scores de corrélation initiaux tout en respectant la régularité de la surface, ce qui permet de résoudre le problème de perte de facettes ou de mauvaise segmentation d'une facette. Le deuxième cas particulier, consiste en la superposition de deux facettes, qui peut être due à des problèmes de délimitations de facettes, les capacités d'arêtes sont choisies de telle façon que les sauts entre facettes superposées soient pénalisés et que le passage d'une facette à une autre se fasse uniquement sur les bords de facettes.

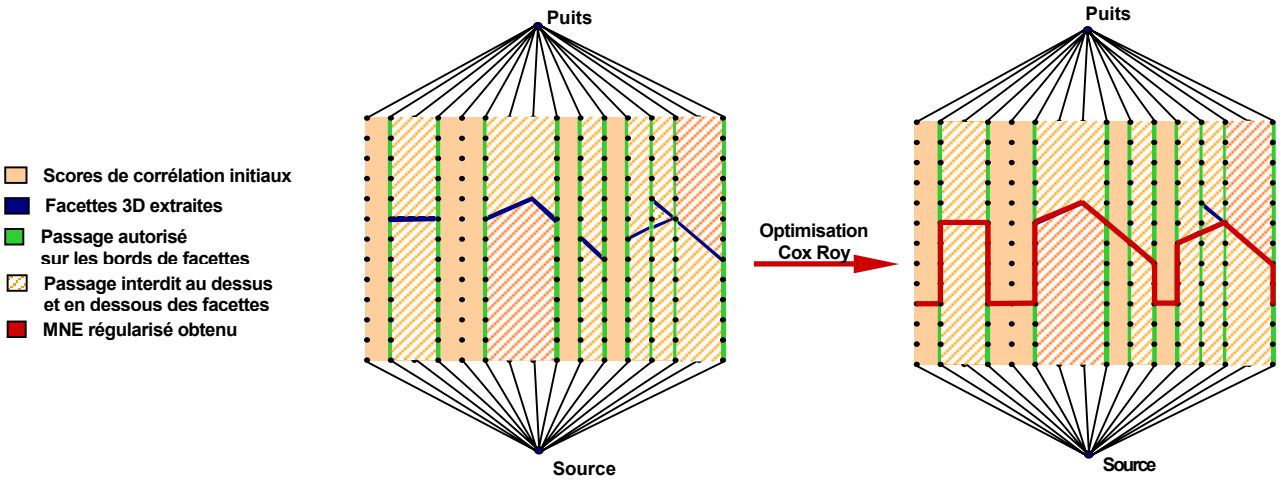
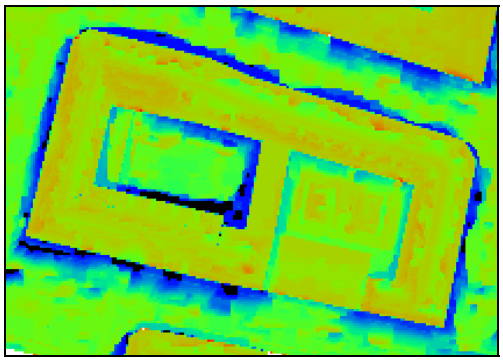


figure B.3.11 *: optimisation globale hybride en 3D*

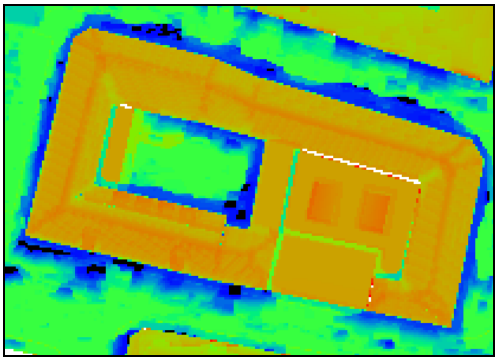
Évaluation

La figure B.3.12 illustre les premiers résultats de l'optimisation sur un couple à 45 cm. Les images de différences entre un MNE TRAPU de référence et les MNE obtenus sont présentées. La figure B.3.12-a montre le résultat de l'optimisation sur le cube de corrélation initial sans utilisation de facettes, la figure B.3.12-b montre le résultat avec l'utilisation des facettes 3D.

Pour cet exemple, on utilise les facettes du MNE de référence pour s'affranchir des problèmes de délimitation. À ce niveau, en sortie de l'algorithme, on obtient un MNE raster régularisé grâce aux facettes 3D. Grâce à la correspondance Région/Facette, on peut remonter à l'information vectorielle en 3D, ce qui s'illustre par un ensemble de polygones représentant les facettes 3D et des points 3D ailleurs.



B.3.12-a optimisation sans facettes
Sur les toits : μ = - 0,78 m et σ = 1,18



B.3.12-b optimisation avec facettes
Sur les toits : μ = - 0,06 m et σ = 0,58

figure B.3.12 *: images de différence de MNE générés avec le MNE TRAPU*

On remarque visuellement que l'optimisation avec facettes régularise nettement le MNE au niveau des toits. En effet, si on s'intéresse uniquement aux toits, aux endroits où les facettes ont été utilisées, la moyenne par rapport au MNE de référence passe de - 0,78 m à - 0,06 m avec un écart-type de 0,58 m. L'écart est essentiellement dû aux problèmes de discrétisation des facettes dans le cube. Le pas de discrétisation en z est de 45 cm dans ce cas.

Les effets de discrétisation sont visibles sur la figure B.3.12-b où les facettes obtenues ne sont pas très lisses. Il faut trouver un compromis entre précision de reconstruction (pas de discrétisation du cube) et temps de calcul du cube. Le problème reste à traiter.

On peut voir aussi les problèmes de débordements en bord de bâtiment qui correspondent surtout à des régions au sol qui ont été bien corrélées. Ce problème peut être résolu par l'utilisation de segments 3D pour délimiter les bords de bâtiments, ou bien par la modélisation du sol grâce au réseau routier.

Dans cet exemple illustré, on suppose qu'on a une hypothèse de facette par région, or on peut très bien avoir plusieurs hypothèses concurrentes pour une même région et on optimise de la même façon la surface 3D. Ce qui permettrait de s'affranchir de la partie de recherche de coupe optimale dans les hiérarchies.

L'avantage de cette approche est la possibilité de contraindre le problème d'optimisation avec tout type de données externes. Par exemple, d'autres primitives 3D comme les segments 3D qui sont plus précis en planimétrie permettront d'autoriser explicitement les discontinuités au niveau des segments 3D ou bien le passage d'une facette à une autre ce qui correspondrait à un faîte de toit. On peut aussi utiliser le réseau routier 3D pour modéliser le sol grâce à la hauteur des pieds de bâtiments. L'utilisation de cette dernière information permettrait d'éviter les problèmes de débordements de facettes sur le sol (voir figure B.3.12).

Un autre avantage de cette méthode est qu'elle est indépendante du processus d'extraction des facettes et des primitives 3D en général. Dans le cadre de notre étude, on se place dans un contexte satellitaire mais la méthode reste applicable avec tout type d'images : aériennes, haute résolution, faible ou fort B/H à condition d'utiliser les facettes 3D adéquates dans chaque cas.

Une limitation pour cette approche consiste dans le fait que les facettes 3D soient fiables pour assurer une bonne optimisation de la surface 3D, en effet comme on force explicitement le passage par les facettes, si les facettes sont mal estimées, la surface finale le sera aussi. Les pentes estimées doivent obligatoirement être fiables. Par contre, les problèmes de délimitation de facettes, par exemple, peuvent être résolus, soit en utilisant des segments 3D, soit en modélisant le sol.

Conclusions

On a présenté dans un premier temps, une méthode de détection et de reconstruction de facettes 3D adaptée au contexte satellitaire. L'originalité de notre approche consiste à apparier des primitives 2D entre deux images pour émettre des hypothèses de facettes 3D en milieu urbain et d'adapter chaque étape au contexte satellitaire. En effet, le couple stéréoscopique a un faible rapport B/H ce qui entraîne une perte de précision altimétrique lors de la reconstruction 3D, d'où l'utilisation des régions qui constituent des primitives plus fiables et plus adaptées à des résolutions de l'ordre de 60 cm. Cependant le couple a l'avantage de présenter de faibles distorsions entre les images d'où l'idée d'apparier deux segmentations d'images qui sont initialement assez similaires. La méthode de reconstruction de facettes 3D proposée se base sur trois grandes parties classiques qui tiennent compte à chaque étape du faible B/H du couple et qui traitent de façon symétrique le couple d'images. Tout d'abord, la segmentation hiérarchique où l'on utilise des critères de fusion adaptés pour obtenir des régions correspondant aux toits de bâtiments et qui permet surtout de choisir le niveau d'interprétation souhaité grâce à des coupes dans la hiérarchie. Ensuite on traite le problème de l'appariement des régions.

La nouveauté, dans notre approche, est la propagation des contraintes dans la hiérarchie qui rend l'algorithme plus robuste au bruit, aux sur-segmentations des régions et réduit considérablement le temps de calcul. Ensuite les étapes d'appariement sont adaptées au contexte satellitaire : au niveau du calcul du volume de corrélation initial, de la discrétisation subpixellaire en z du cube, et finalement l'estimation robuste des plans 3D pour la scène 3D finale. On a présenté par la suite, une méthode d'optimisation globale de la scène 3D, basée sur les flots de graphes.

Cette approche permet d'introduire l'information vectorielle fiable extraite et des données externes pour générer un MNE hybride. Ce MNE hybride raster/vecteur combine la grille régulière correspondant au MNE initial et l'information vectorielle correspondant aux primitives 3D fiables extraites. L'approche détaillée peut s'appliquer à la reconstruction de bâti dans différents contextes, à différentes résolutions et avec différents B/H.

Perspectives

Les premiers résultats obtenus sont satisfaisants. On envisage deux améliorations à court terme. Pour le processus d'extraction de facettes 3D, on envisage de réaliser un recalage fin des facettes 3D à l'intérieur du cube de corrélation. Au moment de l'estimation du plan final, les points 3D seront pondérés par leurs scores de corrélation. Pour l'optimisation globale, on envisage tout d'abord d'utiliser effectivement les données externes et d'autres primitives 3D en complément aux facettes 3D. On envisage par la suite de réaliser une optimisation vectorielle en introduisant des contraintes vectorielles sans avoir à discrétiser les facettes. Finalement, il restera à évaluer les résultats de l'optimisation globale de façon quantitative par rapport à un MNE de référence. Deux niveaux d'évaluation sont envisagés : le niveau raster où l'on fera des évaluations point à point et au niveau vecteur où il faudra utiliser des critères spécifiques aux facettes pour traduite la régularité de la surface, comparer les pentes, etc.

Remerciements

L'auteur tient à remercier l'IGN et le CNES pour lui avoir fourni les images aériennes de la ville d'Amiens et les simulations des images satellitaires haute résolution réalisées sur Toulouse.

Références

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

[BAILLARD 99] C. Baillard and A. Zisserman : *Automatic reconstruction of piecewise planar models from multiple views*, in Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR'99, pp. 559-565, juin 1999.

[FORD,FULKERSON 62] L.Ford and D.Fulkerson, *Flows in Networks*, Princeton University Press,1962.

[GUIGUES 03] L. Guigues, H. Le Men and J.-P. Cocquerez : *Scale-sets image analysis,* ICIP'03, pp. 299-306, Barcelone (E), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-031-C-COM-LG, 2003.

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

[FRASER 01] CS. Fraser, E. Baltsavias and A. Grün : *3D Building Reconstruction from high Resolution Ikonos stereo Imagery*, ASCONA'01, Automated Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III), pp 331-344, ISBN 90.5809.252.6, 2001.

[KANUNGO 95] T. Kanungo, B. Dom, W. Niblack, D. Steele and J. Sheinvald : *MDL-based Multi-band Image Segmentation using a fast Region merging Scheme*, IBM research Report, RJ 9960, mai 1995.

[NORONHA 01] S. Noronha and R. Nevatia : *Detection and modeling of Buildings from multiple aerial Images*, PAMI'01, vol. 23(5), pp 501-518, May 2001.

[ORTNER 03] M .Ortner, X. Descombes & J. Zerubia : *Un nouveau modèle pour l'extraction de caricatures de bâtiments sur des modèles numériques d'élévation*, TAIMA'03, pp 213-218, Hammamet (Tunisie), octobre 2003.

[ROY, COX 98] S. Roy and I. Cox : *A maximum-flow formulation of the n-camera stereo correspondance problem,* ICCV'98, 1998.

[SOHN 01] G. Sohn and J. Dowman : *Extraction of Buildings from High-Resolution Satellitaire Data*, ASCONA'01, Automated Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III), pp 345-355, ISBN 90 5809 252 6, 2001.

[SVCG 89] P. Sander, L. Vinet, L. Cohen and A. Gagalowicz : *Hierarchical Region based Stereo Matching*, SCIA, in Proceedings of the 6th Scandivian Conference on Image Analysis, pp 71-78, juin 1989.

[VESTRI 01] C. Vestri and F. Devernay : *Using robust methods for automatic extraction of buildings*, in Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recongnition,CVPR'00, IEEE, Hawaii, 2001.

[VINSON, COHEN 02] Vinson and L. Cohen : *Multiple Rectangle Model for Buildings Segmentation and 3D Scene Reconstruction*, ICPR'02, 16th International Conference on Pattern Recognition, vol. I, pp. 125-134, Québec, Canada, 2002.

Publications

[CHEHATA 02] N. Chehata, M. Pierrot Deseilligny, F. Jung and G. Stamon : *Extraction of 3D primitives from stereopairs of satellitaire images for automatic reconstruction of buildings,* in Actes MVA'02, pp. 636-639, Japon, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-020-C-COM-NC, décembre 2002.

[CHEHATA et al 03] N. Chehata, F. Jung, M. Pierrot Deseilligny and G. Stamon : *A Region Based Approach for 3D-Roof Reconstruction From HR Satellite Stereo Pairs*, DICTA'03, Vol II, pp. 889-898, Sydney, Australie, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-032-C-COM-NC, 2003.

[CHEHATA et al 04] N. Chehata, F. Jung, M. Pierrot Deseilligny & G. Stamon, *Reconstruction de facettes 3D par approche hiérarchique par régions à partir de couples d 'images satellite en milieu urbain*, SETIT'04, 15-20 mars 2004, Tunisie, laboratoire MATIS, IGN-SR-04-014-C-COM-NC, 2004.

B.4 Segmentation multi-échelles d'images : théorie et applications

Laurent Guigues, Roger Trias-Sanz, Nesrine Chehata, Franck Taillandier & Matthieu Deveau

Introduction

De manière assez générale, « segmenter » une image consiste à délimiter dans l'image des plages « régulières » ou « cohérentes », c'est-à-dire des zones dans lesquelles les valeurs de l'image suivent, à un certain degré, un modèle donné d'organisation : zones relativement homogènes en intensité, en texture ou en couleur, zones relativement planes, lisses (de variations lentes), etc. La segmentation automatique est un problème important de l'analyse d'image, car la plupart du temps, les objets sémantiques d'une scène ou leurs sous-parties se projètent en plages « cohérentes » dans une image. De nombreux systèmes d'interprétation d'images ou de modélisation de scènes s'appuient donc - entre autres - sur une première étape de segmentation en régions, chargée d'extraire des constituants élémentaires, ou « primitives », qui serviront de base pour l'identification ou la reconstruction d'objets.

De très nombreuses recherches ont été consacrées au problème de segmentation automatique depuis les années soixante-dix, Cf. e.g. [COCQUEREZ, PHILIPP 95]. Le problème est classiquement envisagé comme une question de découpage de l'image en régions disjointes : le résultat d'un algorithme de segmentation est alors une *partition* du domaine de l'image. Dans notre thèse [GUIGUES 03a], nous avons mis en évidence certains problèmes de fond posés par cette approche, problèmes liés au fait qu'il existe, en règle générale, plusieurs échelles d'analyse possible d'une image. En pratique, ces problèmes se traduisent par des difficultés de paramétrage et des défauts d'invariance des algorithmes qui les rendent difficilement exploitables dans des chaînes automatiques d'analyse d'images. Ces constats nous ont conduis à développer une approche multi-échelles de la segmentation d'images qui prend en compte la dimension d'échelle dans l'analyse en régions cohérentes d'une image et produit une description multi-échelles de l'image, sous la forme d'une hiérarchie de régions qualifiées par des intervalles de vie en échelle, ce que nous avons appelé une *analyse ensembles-échelle* de l'image.

Cet article est divisé en deux grandes parties. Dans la première, nous décrivons les principaux aspects de cette théorie multi-échelles de la segmentation. La seconde en présente alors plusieurs applications qui ont été développées par différents chercheurs du laboratoire MATIS :

- saisie semi-automatique de la couche arborée de la BDTOPO, *Laurent Guigues* ;
- détermination du parcellaire d'occupation du sol à partir de la composante photographique et de la composante cadastrale du Référentiel à Grande Échelle (RGE), *Roger Trias-Sanz* ;
- stéréo-restitution par appariement de régions extraites de couples d'images de satellites à très haute résolution, *Nesrine Chehata* ;
- modélisation par facettes planes de Modèles Numériques de Surface (MNS), *Franck Taillandier* ;
- modélisation d'édifices remarquables à partir de données laser, *Matthieu Deveau*.

Analyse ensembles-échelle d'une image

Modélisation approchée et échelle

À partir de la fin des années 80, de nombreux problèmes d'analyse d'image ont systématiquement été formulés comme des problèmes de modélisation optimale (restauration, stéréovision, segmentation…). Formellement, si $\mathcal{I}$ est l'ensemble des images qui nous intéressent, on définit un espace $\mathcal{M}$ de modèles possibles de ces images et une énergie E sur les couples *(image, modèle)*. Pour une image donnée, le problème est alors d'en trouver le « meilleur modèle », c'est-à-dire d'exhiber le modèle M qui minimise $E(I,M)$. Un tel problème comporte trois aspects : la définition de $\mathcal{M}$, celle de E et la question de l'optimisation elle-même.

L'espace des modèles est généralement dicté par la nature du problème. En partitionnement d'image, un modèle d'image est également une image mais définie par morceaux, morceaux au sein desquels le comportement de l'image est « régulier » : valeurs constantes ($I(xy)=c$), variant linéairement ($I(x,y)=ax+by+c$), dont certains paramètres texturaux sont constants, etc. Un modèle est donc défini par i) une partition du domaine de l'image et ii) un modèle paramétrique du comportement de l'image au sein de chaque région de la partition, modèle déterministe ou probabiliste (e.g. distribution gaussienne des valeurs). Nous restreignons ici notre propos au cadre déterministe. Un développement complètement parallèle peut toutefois être conduit pour le cadre probabiliste, Cf. [GUIGUES 03a].

Dans un cadre déterministe, un modèle d'image segmentée est également une image. On peut donc immédiatement se doter d'une distance D entre modèles et images, par exemple en considérant la somme des écarts quadratiques entre les valeurs du modèle et celles de l'image (norme L_2). Il est alors naturel de stipuler que le « meilleur modèle » au sens de cette distance est le modèle le plus proche de l'image analysée, i.e. celui qui minimise $D(I,M)$. La solution de ce type de problème n'est toutefois généralement pas satisfaisante. En effet, l'espace des modèles considérés contient la plupart du temps l'espace des images, si bien qu'il existe toujours une solution triviale, l'identité, qui annule $D(I,M)$. Si l'on s'intéresse par exemple à une modélisation en plages constantes de l'image, une solution exacte consiste à diviser l'image en autant de régions qu'elle possède de pixels ! En pratique, on cherche bien entendu à trouver des zones qui correspondent à des phénomènes cohérents de taille supérieure au pixel. Il ne s'agit donc pas de trouver les plages de stricte constance de l'image mais de trouver des plages sur lesquelles l'image est *approximativement* constante.

Le bruit, certaines irrégularités, certains détails ténus ou de petite taille ne nous intéressent pas. Bref, nous recherchons une caricature des données qui ne tienne pas compte de certains phénomènes de trop petite échelle (i.e. amplitude spatiale ou radiométrique).

Se pose alors la question de la *précision d'approximation*. Si I est une image et ε un réel positif, appelons ε-*approximation* de I tout modèle M tel que $D(I,M)\leq\varepsilon$. Pour ε donné, il existe *a priori* de nombreuses ε-approximations possibles de I. Il faut donc définir la manière dont nous choisissons l'une d'elles, ce qui peut à nouveau se formaliser comme un problème de minimisation d'énergie. Supposons que nous soyons capables de définir une énergie C sur $\mathfrak{M}$ qui traduise nos préférences *a priori* pour les différents modèles, c'est-à-dire qui attribue une énergie d'autant plus faible à un modèle que ce modèle nous paraît « probable », « préférable » ou « agréable » en soi, c'est-à-dire indépendamment de toute image. Le problème de l'ε-modélisation d'une image I peut alors s'exprimer comme un problème d'optimisation sous contrainte :

$P_\varepsilon(I)$: Trouver M qui minimise $C(M)$ sous la contrainte $D(I,M)\leq\boldsymbol{\varepsilon}$.

L'énergie C peut être de différentes natures. Elle peut traduire certaines connaissances objectives sur les données ou s'appuyer sur des critères relativement subjectifs et viser à favoriser une interprétation spécifique des données. Ce problème sous contrainte possède toutefois une signification remarquable dans le cas où C s'interprète comme une mesure de *complexité* des différents modèles (objective ou subjective). En effet, $P_\varepsilon(I)$ formalise alors l'idée que *de deux modèles également fidèles aux données, il faut retenir le plus simple*, c'est-à-dire formalise un *principe de parcimonie*. Il existe alors une expression duale de ce principe, à savoir que *de deux modèles également complexes, il faut retenir le plus fidèle aux données.* À cette seconde forme correspond un problème d'optimisation dual :

$P^*_\gamma(I)$: Trouver M qui minimise $D(I,M)$ sous la contrainte $C(M)\leq\gamma$.

Ce couple de problèmes duaux est bien connu en théorie de l'information où il formalise les questions de compression avec perte [SHANNON 59]. Dans ce cadre, l'énergie C, appelée débit, représente la quantité d'informations nécessaires pour décrire le modèle (i.e. la taille des données compressées) et D, appelée distorsion, mesure les pertes occasionnées par la compression. Pour un quota de pertes donné, on cherche à obtenir le meilleur taux de compression (problème primal) ou inversement, pour un taux de compression donné, on cherche à minimiser les pertes (problème dual). On parle de problèmes de débit/distorsion opérationnels.

Classiquement, la résolution d'un problème de minimisation sous contrainte s'effectue par minimisation du lagrangien qui lui est associé. Les lagrangiens associés à $P_\varepsilon(I)$ et $P^*_\gamma(I)$ sont respectivement :

$$E_\mu(I,M) = \mu D(I,M) + C(M)$$

et

$$E^*_\lambda(I,M) = \lambda C(M) + D(I,M)$$

où les réels μ et λ sont appelés les multiplicateurs de Lagrange. Sous des conditions larges, on montre que les solutions de $P_\varepsilon(I)$ (resp. $P^*_\gamma(I)$) sont en bijection avec les minima de $E_\mu(I,M)$ (resp. $E^*_\lambda(I,M)$), chaque valeur de ε (resp. γ) correspondant à une valeur particulière de μ (resp. λ) pour laquelle le minimum du lagrangien et la solution du problème sous contrainte sont identiques.

Avec les expressions lagrangiennes, nous retrouvons les formulations énergétiques habituellement employées en analyse d'image. $E^*_\lambda(I,M)$ correspond par exemple à l'expression générale d'un problème variationnel mal posé qui a été régularisé, D est alors appelée une énergie « d'attache aux données » et C une énergie de « régularisation ». En segmentation, l'archétype de ce type de formulation est donné par la fonctionnelle de Mumford et Shah [MUMFORD, SHAH 89]. Dans le cadre de l'inférence bayesienne, $E^*_\lambda(I,M)$ peut également s'interpréter comme le potentiel de Gibbs associé à une probabilité du modèle sachant les données ou probabilité « *a posteriori* » [GEMAN, GEMAN 84]. Dans ce cas, $exp(-D(I,M))$ correspond (à un facteur de normalisation près) à la vraisemblance des données sachant le modèle et $exp(-\lambda C(M))$ à la probabilité « *a priori* » du modèle. Minimiser $E^*_\lambda(I,M)$ est équivalent à maximiser $exp(-E^*_\lambda(I,M))$, qui est proportionnel à la probabilité *a posteriori* du modèle.

Envisager une énergie $E_\mu(I,M)$ comme le lagrangien du problème $P_\varepsilon(I)$ permet toutefois d'interpréter sa minimisation comme la résolution d'un problème d'ε-*approximation* optimale de l'image et met donc en lumière le rôle du paramètre μ. μ est relié de façon monotone à la précision de l'approximation trouvée et agit donc comme un *paramètre d'échelle*. En outre, on remarque que les minima de $E_\mu(I,M)$ et $E^*_\lambda(I,M)$ coïncident quand $\lambda=1/\mu$, ce qui implique que, prises comme des touts, les familles de solutions des deux problèmes duaux d'optimisation sous contrainte s'identifient. À chaque précision ε correspond donc une borne de « complexité » $\gamma(\varepsilon)$ et rechercher une ε-approximation de complexité C minimale est équivalent à rechercher la plus fidèle des approximations de complexité inférieure à $\gamma(\varepsilon)$. En d'autres termes, à l'optimum, la précision et la complexité de la modélisation varient conjointement : il n'y a qu'un paramètre libre qui est un facteur joint de précision-complexité, que nous appellerons le paramètre « d'échelle ».

Ensembles et échelle

Une fois un problème de segmentation écrit en termes de minimisation d'une énergie du type $E^*_\lambda(I,M)$, l'approche actuelle consiste alors à fixer une valeur de λ et rechercher un minimum d'énergie. En segmentation, il s'agit typiquement de trouver une partition du domaine de l'image sur laquelle s'appuient des morceaux de fonctions paramétriques. Si la partition est fixée, trouver le meilleur morceau au sein de chaque région se réduit généralement à un problème simple de régression (ou de maximum de vraisemblance quand la modélisation est probabiliste). La difficulté est alors de trouver le meilleur découpage, ce qui, même pour les énergies les plus simples, est un problème d'optimisation de combinatoire explosive (NP-dur). Il existe bien des techniques d'optimisation globale, comme le recuit simulé, mais elles ne sont pas utilisables sur des données de taille raisonnable car elles sont extrêmement gourmandes en temps de calcul.

Quoi qu'il en soit, même si l'on savait minimiser efficacement ce type d'énergie, l'approche par partitionnement pose des problèmes de fond, qui sont liés au fait que le paramètre λ doit être fixé *a priori*. Imaginons en effet que l'on cherche à segmenter des parcelles cultivées vues d'avion. Certaines parcelles sont très homogènes, d'autres très texturées, certaines parcelles sont de petite taille, d'autres assez étendues…. Bref, l'aspect des cultures dans une image aérienne est relativement variable, ce qui se traduit par le fait qu'il n'existe généralement pas de valeur de λ qui fournisse une délimitation correcte

du parcellaire sur l'ensemble d'une scène. Par exemple, à l'échelle où les champs labourés apparaissent en une seule pièce, certains champs homogènes voisins et d'aspect proche se trouveront également regroupés, certaines limites de cultures étant alors perdues. En outre, la solution obtenue pour un λ donné change si l'on effectue des transformations géométriques ou radiométriques sur les images : homothétie, changement de dynamique, etc. Ainsi, si D est la norme L_2 et que l'on éclaircit une image I d'un facteur f, alors pour retrouver le minimum de $E^*_\lambda(I,M)$ obtenu sur I, il faut régler l'énergie à $f^2\lambda$. Ces difficultés de paramétrage rendent les algorithmes de partitionnement d'image difficilement utilisables dans des systèmes automatiques d'analyse d'image.

L'expérience montre pourtant que l'approche par minimisation d'énergie de la segmentation fournit de bons résultats *quand on peut réaliser un paramétrage* ad hoc *pour chaque image ou objet d'intérêt*. Nous avons donc proposé de revoir le résultat classique d'un algorithme de segmentation : plutôt que de produire une seule partition d'une image, correspondant à un réglage donné de λ, la méthode développée produit - nous verrons sous quelle forme - une famille complète de partitions $(P_\lambda)_{\lambda \in R+}$, famille qui approxime l'ensemble des minima d'une énergie du type E^*_λ. Autrement dit, notre algorithme produit une analyse *multi-échelles* de l'image en termes de régions « cohérentes » sur une certaine gamme d'échelles. L'idée est simple : si le paramètre d'échelle λ ne peut pas être réglé *a priori* et globalement - car des formes pertinentes peuvent apparaître dans différentes gammes de taille ou de contraste - il faut alors le laisser libre et offrir la possibilité à un utilisateur ultérieur, homme ou machine, de rechercher activement dans la structure multi-échelles de l'image les formes qui l'intéressent. Autrement dit, la bonne question n'est pas : que voit-on à telle échelle ? Mais : à quelle échelle trouve-t-on les formes qui nous intéressent ? Pour répondre à cette question, il faut pouvoir naviguer librement dans la structure multi-échelles de l'image.

Exhiber une famille $(P_\lambda)_{\lambda \in R+}$ de partitions proche des minima de E^*_λ semble, à première vue, encore plus complexe que de produire une solution isolée. Toutefois, si l'on impose à ces partitions de constituer une famille de partitions *emboîtées*, on aboutit alors à une solution remarquable. Détaillons maintenant ce point, sur lequel repose l'ensemble de notre démarche.

Comme nous l'avons vu ci-dessus, en étant relié à la précision d'une approximation de l'image, le paramètre λ possède le sens d'une échelle. Quand $\lambda = 0$, on obtient un modèle exact de l'image, comportant une myriade de détails, et à l'inverse, pour une valeur suffisamment grande de λ, qui correspond à une valeur de ε suffisante pour tolérer toutes les variations de l'image, l'image est résumée par une seule région.

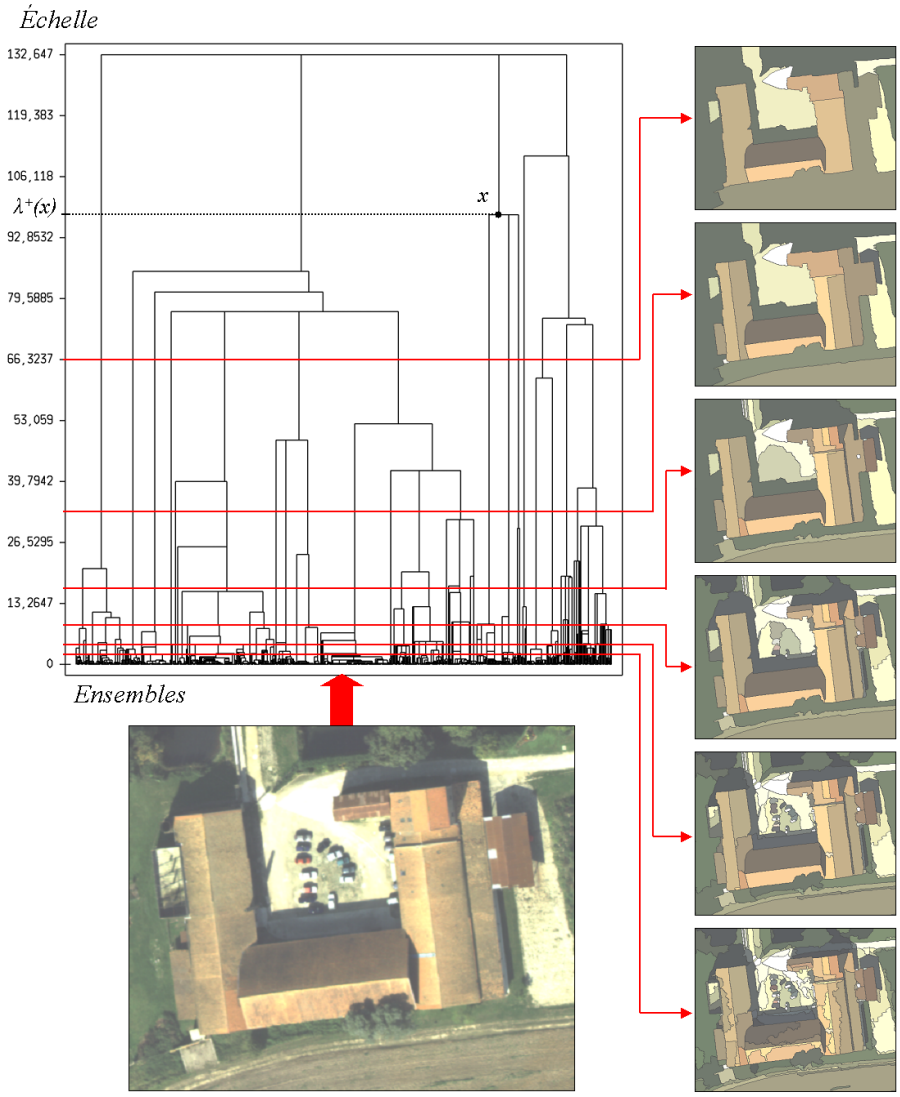


figure B.4.1 *: une description ensembles-échelle d'une image et certaines de ses coupes horizontales (à échelle fixe). Le modèle considéré est constant par morceaux, D est la norme L_2 et C est une mesure de complexité privilégiant les formes convexes. La description a été obtenue par l'algorithme d'escalade initialisé à partir d'une sur-segmentation par ligne de partage des eaux de l'image.*

Remarquons alors que dans le cadre d'une modélisation ensembliste de données, l'idée de structure multi-échelles est associée à une autre idée que celle d'analyse de précision variable : celle d'ensembles emboîtés et de hiérarchie. En effet intuitivement, d'un point de vue structurel, diminuer une « échelle » d'analyse révèle des détails *internes* aux structures vues à plus grande échelle, c'est-à-dire permet de descendre de niveau dans une hiérarchie de structures. En termes de partitions, une séquence $(P_\lambda)_{\lambda \in R+}$ de partitions peut donc être considérée comme une séquence multi-échelles de paramètre d'échelle λ, si pour tout $\lambda_1 < \lambda_2, P_{\lambda 1}$ est systématiquement une *sur-partition* de $P_{\lambda 2}$, c'est-à-dire s'obtient en re-découpant certains des ensembles de $P_{\lambda 2}$. $(P_\lambda)_{\lambda \in R+}$ constitue alors une séquence de partitions emboîtées, de finesse décroissante avec λ.

Nous nous sommes donc intéressés aux solutions du problème de modélisation optimale qui se présentent sous la forme de séquences de partitions emboîtées.

Un point fondamental est que dans ce cas, la séquence $(P_\lambda)_{\lambda \in R+}$ peut être représentée *in extenso*, toutefois en adoptant une représentation implicite. Il est en effet bien connu dans le domaine de la classification hiérarchique que la donnée d'une séquence $P = (P_\lambda)_{\lambda \in R+}$ de partitions emboîtées est équivalente à celle d'une *hiérarchie indicée* (Benzécri disait *stratifiée*), c'est-à-dire d'un couple (H, λ^+) où H est une hiérarchie de régions (un système d'ensembles deux à deux disjoints ou emboîtés) et λ^+ est une fonction de H dans R^+ qui indique pour chaque région r *la plus petite échelle* à partir de laquelle r appartient à une des partitions de P. Nous avons appelé cette échelle caractéristique l'*échelle d'apparition* de r. Une hiérarchie indicée peut être représentée graphiquement par un arbre d'inclusions de régions dans lequel chaque région est placée à une ordonnée qui correspond à son échelle d'apparition (voir la figure B.4.1, page précédente).

Les ensembles se déploient donc selon l'axe des abscisses et l'axe des ordonnées est un axe d'échelle. En référence à la théorie scale-space (espace-échelle) du filtrage d'images [LINDEBERG 94], dont notre méthode représente le pendant ensembliste, nous avons baptisé une telle structure une *description ensembles-échelle d'une image (scale-sets)*. Disposant du couple (H, λ^+), on retrouve alors les partitions P_λ en *sectionnant* la structure ensembles-échelle, c'est-à-dire en effectuant des *coupes horizontales* dans (H, λ^+) : les élements de P_λ sont les plus grandes régions de H dont l'échelle d'apparition λ^+ est inférieure à λ (figure B.4.1).

D'un point de vue pratique, une hiérarchie bâtie sur un ensemble à N éléments possède au plus $2N-1$ ensembles, dont les N singletons qui se retrouvent à la base de la hiérarchie. Le volume d'une description ensembles-échelle d'une image est donc linéaire en fonction de la taille de l'image. Réaliser une section dans une telle structure est alors instantané : cela revient à effectuer un seuillage sur une image.

Ces aspects sont bien connus en classification, toutefois - à notre connaissance - envisager une hiérarchie indicée comme une représentation implicite d'une séquence de solutions d'un problème d'optimisation, et rattacher le poids d'une fonctionnelle énergétique à un indice hiérarchique est nouveau. Voyons maintenant la manière d'obtenir ce type de description à partir d'une formulation énergétique du problème de modélisation par parties d'une image.

Coupes minimales emboîtées

Nous venons de voir qu'il faut deux types de données pour déterminer complètement une séquence $(P_\lambda)_{\lambda \in R+}$ de partitions emboîtées : une hiérarchie de régions et un indice sur cette hiérarchie qui positionne ces régions sur l'axe des échelles. Remarquons alors que si l'on ne dispose pas d'indice sur H, la notion de section, c'est-à-dire de coupe « horizontale », n'est pas définie. Il existe alors un nombre énorme de façons réaliser une coupe dans H, i.e. de construire une partition à partir des éléments de H (le nombre de coupes possibles est généralement exponentiel en fonction de la taille de H, Cf. [GUIGUES 03a], pp. 151-153).

Nous avons alors montré que si :

i) l'énergie E^*_λ est *séparable*, i.e. peut s'écrire pour une partition P :

$$E^*_\lambda(P) = \sum_{R \in P} \lambda C(R) + D(R)$$

et ii) l'une ou l'autre des énergies C ou D varie de façon *monotone* en fonction de la finesse des partitions,

alors, quelle que soit la hiérarchie H considérée, la famille de ses coupes minimales pour E^*_λ constitue une famille de partitions emboîtées.

Nous avons donc appelé une énergie qui vérifie ces deux conditions une énergie multi-échelles.

L'hypothèse de séparabilité est une hypothèse relativement fréquente en segmentation, elle revient à supposer que l'énergie de chaque morceau du modèle est indépendante de celle des autres. De son côté, l'hypothèse de monotonie de C ou D est tout à fait intuitive : si l'on raffine le modèle, c'est-à-dire si l'on passe d'une partition P à une sur-partition Q de P, on s'attend à ce que la « complexité » C de Q soit jugée supérieure à celle de P et simultanément à ce que la distance D du modèle s'appuyant sur Q à l'image soit moindre que celle du modèle s'appuyant sur P. De fait, les énergies habituellement utilisées en segmentation se comportent de cette manière. Par exemple, si l'on mesure la complexité d'un modèle au nombre de ses régions ou à la longueur totale des frontières présentes dans la partition qui lui correspond, on obtient des énergies croissantes avec la finesse. De même, si chaque morceau de modèle est obtenu par régression paramétrique en norme L_p et que l'on utilise la même norme pour définir D, alors D est décroissante avec la finesse des modèles.

Le résultat ci-dessus montre donc que si l'on restreint l'espace de recherche à l'ensemble des coupes d'une hiérarchie alors, pour les mesures de distance ou de complexité habituelles, il y a équivalence entre i) finesse d'approximation des valeurs de l'image, ii) complexité de modélisation et iii) finesse « structurelle », i.e. finesse de la partition produite. Le paramètre λ régit simultanément ces trois notions de finesse. Le point remarquable est qu'il suffit qu'*une seule* des deux énergies soit monotone pour que cette propriété se transmette aux minima d'énergie.

La donnée d'une hiérarchie H et d'une énergie multi-échelles induit donc une famille de partitions emboîtées et comme nous l'avons vu, cette famille est totalement déterminée si l'on connaît l'indice sur H qui lui correspond. Nous avons proposé un algorithme exact et efficace pour calculer cet indice qui s'appuie sur un principe de programmation dynamique dite « fonctionnelle », c'est-à-dire manipulant formellement les fonctions d'énergie des coupes minimales de H en fonction de l'échelle.

Hiérarchies optimales et approximation par escalade

Ainsi, connaissant H, on sait déterminer exactement ses coupes minimales et leur représentation implicite *via* λ^+. Reste à construire la hiérarchie elle-même. L'objectif est de trouver une hiérarchie dont les coupes minimales soient aussi proches que possible des minima globaux de l'énergie multi-échelles considérée. Nous avons formalisé cet objectif *via* la définition d'une énergie sur les *hiérarchies*.

Si aucune échelle n'est privilégiée, il est naturel de rechercher une hiérarchie dont les coupes minimales soient *toutes* bonnes. Nous avons donc défini l'énergie totale d'une hiérarchie H par *la somme de l'énergie de ses coupes minimales*, somme calculée sur toutes les échelles :

$$E(H) = \int_{\lambda \in R^+} E^*_\lambda(\Gamma_\lambda) d\lambda$$

où Γ_λ désigne la coupe optimale à l'échelle λ de H.

Nous avons finalement proposé de poser le problème de segmentation multi-échelles d'une image I comme celui de dégager la hiérarchie de régions sur I d'énergie totale minimale (pour des raisons techniques qu'il serait bien trop long de développer ici, il faut considérer la maximisation d'une quantité complémentaire de l'énergie définie ci-dessus, Cf. [GUIGUES 03a], pp.190-193).

Nous avons montré que le problème est bien posé, au sens où sa solution n'est généralement pas triviale. Cependant, en exhiber la solution exacte est vraisemblablement infaisable en temps raisonnable pour des données de taille non ridicule (nous avons de bonnes raisons de penser que le problème est NP-dur). Néanmoins, la manière dont se comportent les coupes minimales d'une hiérarchie nous a permis de dégager une stratégie privilégiée pour en construire une solution approchée que nous avons appelée la stratégie d'*escalade.*

Supposons que l'on veuille construire la hiérarchie progressivement, en partant de la hiérarchie vide et en lui ajoutant des ensembles un par un sans jamais remettre en question l'acquis (stratégie gloutonne). On montre alors que d'un point de vue local, le meilleur choix à chaque étape consiste à ajouter l'ensemble compatible avec la hiérarchie courante qui possède la *plus faible échelle d'apparition*. Cette stratégie revient à simuler une augmentation progressive du paramètre d'échelle et à collecter les régions au fur et à mesure où elles deviennent optimales, ce qui s'apparente à une méthode d'optimisation par non convexité graduelle [BLAKE, ZISSERMAN 87]. On montre également que cela revient à suivre localement la courbe de débit/distorsion du problème [SHANNON 59]. De façon intuitive, ce résultat signifie que la meilleure façon d'approcher la solution par étapes est de procéder comme en généralisation cartographique : *partir du niveau de détail le plus fin et progressivement simplifier la description*.

En termes algorithmiques, le processus qui en dérive est un processus de fusion de régions. Il se trouve alors que l'échelle d'apparition d'un ensemble ne dépend que de ses *sous-structures hiérarchiques*, ce qui implique que la stratégie d'escalade peut être mise en œuvre de façon exacte grâce à la méthode de programmation dynamique proposée, qui fonctionne de manière ascendante dans une hiérarchie. Toutefois, calculer à chaque étape l'échelle d'apparition de tous les sur-ensembles des ensembles déjà collectés est extrêmement combinatoire. En pratique, nous n'avons considéré que les sur-ensembles formés par réunion de *deux* ensembles déjà collectés. Si l'on impose également aux régions d'être connexes, l'algorithme qui en découle est un algorithme d'agrégation récursive de couples de régions voisines, qui agrège à chaque étape le couple de voisines dont l'union possède la plus faible échelle d'apparition. Cette échelle se calcule de façon exacte grâce à l'algorithme de programmation dynamique pour la recherche des coupes minimales d'une hiérarchie. La méthode est simple, efficace et totalement exempte de paramètre.

On montre, en outre, que l'algorithme vérifie les deux propriétés suivantes :

(1) Il produit des *solutions identiques* pour les deux formulations duales du problème de modélisation ;

(2) Il produit une *description invariante d'échelle* au sens où si l'on applique une transformation linéaire sur les énergies alors i) la hiérarchie produite est inchangée et ii) l'axe des échelles est dilaté du même facteur que le facteur d'homothétie appliqué aux énergies.

Le premier point indique que l'approximation trouvée se comporte de la même façon que la solution optimale du point de vue de l'équivalence entre les deux formulations duales du problème.

Le second point montre que régler l'échelle *a priori*, dans la définition des énergies, ou *a posteriori*, par coupe dans la description multi-échelles trouvée est équivalent. Les énergies peuvent donc être définies à un facteur près, il suffit de spécifier *qualitativement* à quelles quantités elles doivent être proportionnelles. Nous atteignons donc l'objectif poursuivi : totalement transférer le réglage de λ à un utilisateur ultérieur, qui dispose alors d'un véritable outil d'exploration, pouvant être réglé dynamiquement, selon les besoins, etc.

La propriété (2) permet également de transposer certaines invariances vérifiées par les énergies à la solution trouvée. Nous avons vu par exemple que si D est la norme L_2 alors éclaircir l'image d'un facteur f multiplie l'énergie D par f^2. D'après (2), avec cette énergie, jouer linéairement sur la dynamique de l'image n'affecte pas la hiérarchie trouvée, mais dilate seulement l'axe des échelles. On voit donc qu'en normalisant les échelles d'apparition par l'échelle d'apparition du sommet de la hiérarchie, on obtient une analyse invariante par manipulation linéaire des valeurs de l'image.

En outre, si l'on associe à la norme L_2 une énergie C proportionnelle au nombre de régions ou à la longueur totale des frontières de la partition on obtient alors un comportement remarquable de l'algorithme face à des *changements de résolution*. En effet, avec ces énergies, une homothétie idéale de l'image se traduit uniquement par une dilatation de l'axe des échelles. Un changement de résolution n'est pas une homothétie idéale car augmenter la résolution fait apparaître de nouveaux détails. Toutefois, l'effet est globalement linéaire dès que les détails supplémentaires introduits par l'augmentation de résolution sont relativement petits par rapport à la taille des régions de la partition considérée. Par exemple, si l'image I_4 correspond à un sous-échantillonnage d'un facteur 4 d'une image I_1 alors en réglant l'échelle sur I_4 au quart de l'échelle choisie sur I_1, on obtient des segmentations pratiquement identiques dès que les régions trouvées ont une taille significativement supérieure à la taille du pixel de I_4 (les limites de régions trouvées sur I_1 sont, bien entendu, *quatre* fois plus résolues que celles trouvées sur I_4). En conclusion, pour des énergies bien choisies, la propriété (2) permet également d'obtenir une relation directe entre « échelle » et résolution.

Exemples

Pour conclure cette première partie, donnons deux exemples de segmentation d'images aériennes. Le modèle utilisé est un modèle constant par morceaux, l'énergie D est la norme L_2 et l'énergie C est une énergie qui mesure le degré de non convexité des formes qu'il serait trop long de détailler ici, voir [GUIGUES 03a], pp. 225-228. L'escalade peut être initialisée à partir d'une division pixellaire de l'image, toutefois une pré-segmentation en régions élémentaires accélère grandement la procédure. Une telle pré-segmentation peut être obtenue efficacement par calcul d'une ligne de partage des eaux sur le module d'un gradient de l'image [BEUCHER, LANTUEJOUL 79]. C'est cette initialisation qui a été utilisée dans les exemples présentés ici (l'exemple de la figure B.4.1 a également été obtenu avec ces énergies et une sur-segmentation par ligne de partage des eaux).

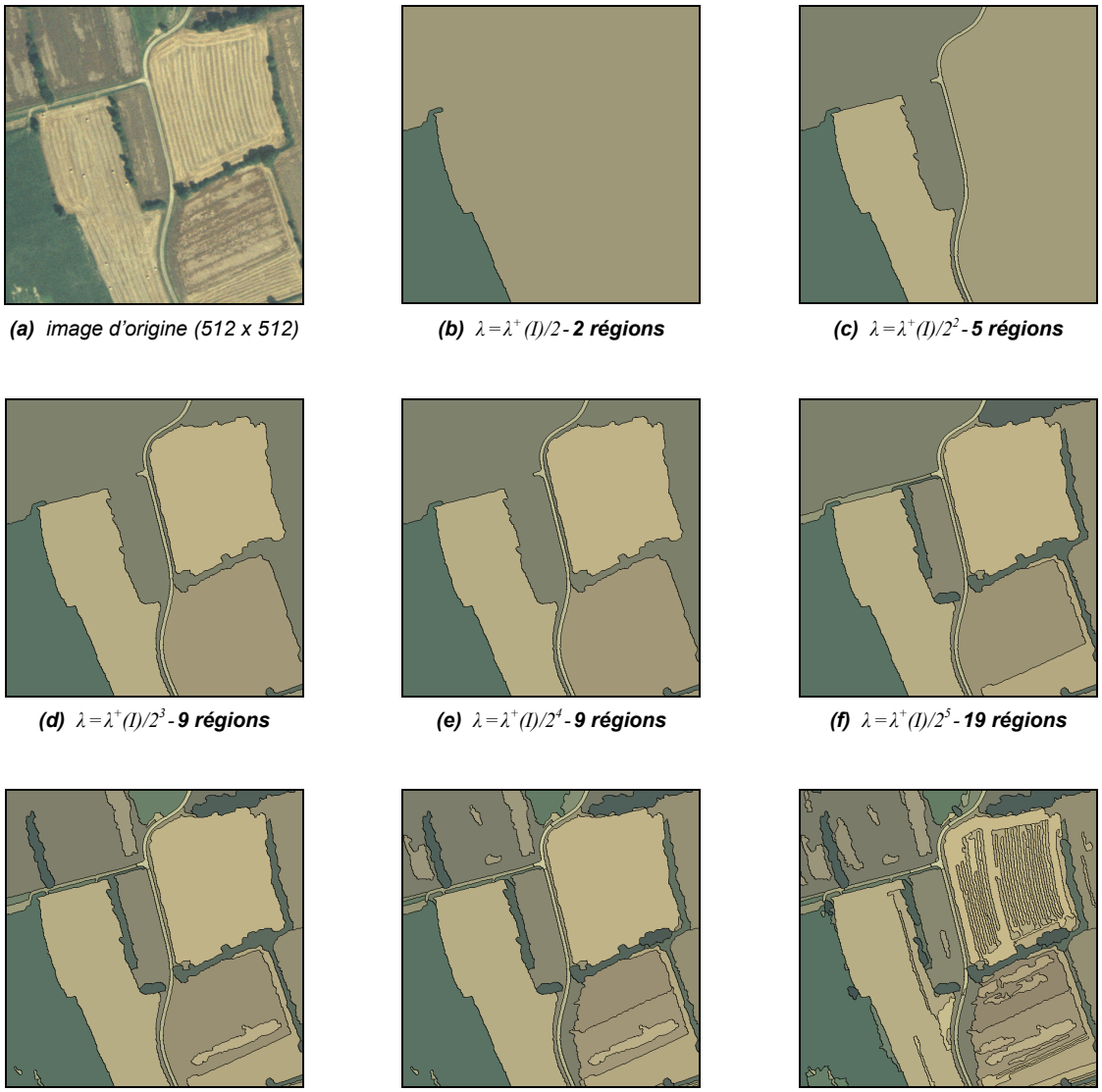
La figure B.4.2 (page suivante) montre un extrait 512 x 512 de la BD ORTHO (Ortho-image couleur à 50 cm de résolution-sol) et huit sections de la description ensembles-échelle obtenue par escalade. Les sections ont été réalisées selon une suite géométrique de raison ½ relativement à l'échelle d'apparition du sommet de la hiérarchie ($\lambda^+(I)$), qui représente l'échelle à partir de laquelle l'image entière est décrite par une seule région.

Cet exemple illustre parfaitement les problèmes que pose le réglage *a priori* d'une seule échelle de segmentation. On peut considérer qu'une bonne description des parcelles visibles dans l'image est obtenue à l'échelle de la section *f*. Toutefois, si l'on souhaite incorporer toutes les haies dans la description, il faut diminuer l'échelle, mais uniquement en certains lieux de l'image, sinon certaines parcelles hétérogènes se trouvent divisées (section g). Les arbres isolés s'obtiennent à une échelle encore plus faible (section i), échelle à laquelle les sillons commencent également à se découper dans les champs.

Aucun réglage fixe du paramètre « d'échelle » ne correspond donc à une description cartographique cohérente sur la scène. En outre, rappelons que le réglage adapté à l'extraction de certains objets spécifiques dépend du contraste de l'image et de l'aspect particulier des objets dans l'image. Typiquement, en imagerie aérienne, l'heure de prise de vue modifie beaucoup l'aspect des objets dans les images, leur contraste, texture… et donc l' « échelle » à laquelle ils sont correctement segmentés.

Il nous semble donc illusoire d'espérer parvenir à une méthode fiable de segmentation automatique en s'appuyant sur un principe de partitionnement à échelle fixe. C'est pourquoi nous soutenons qu'un algorithme de segmentation doit produire une segmentation multi-échelles, une hiérarchie d'objets dans laquelle un utilisateur ultérieur (homme ou machine) puisse librement naviguer pour sélectionner les objets spécifiques qui l'intéressent, et ce en s'appuyant sur des critères de reconnaissance de formes *discriminants*, ce que *ne sont pas* les critères incorporés dans les énergies utilisées en segmentation.

Outre le fait qu'elle produit une famille complète de solutions, la méthode d'escalade détermine de *bonnes* solutions approchées aux problèmes classiques de partitionnement par minimisation d'énergie et ce en temps raisonnable (le calcul complet pour l'image de la figure B.4.1 demande environ deux minutes de calcul avec un processeur à 1,2 GHz). Les résultats obtenus mettent alors en évidence la validité des formulations énergétiques, qui conduisent effectivement à des solutions pertinentes, tout au moins en imagerie aérienne. Pour l'exemple de la figure B.4.2, l'algorithme d'escalade parvient à délimiter toutes les unités pertinentes pour un cartographe (champs, routes, haies, arbres isolés), mais à des échelles différentes.



(a) *image d'origine (512 x 512)*

(b) $\lambda = \lambda^{+}(I)/2$ - ***2 régions***

(c) $\lambda = \lambda^{+}(I)/2^{2}$ - ***5 régions***

(d) $\lambda = \lambda^{+}(I)/2^{3}$ - ***9 régions***

(e) $\lambda = \lambda^{+}(I)/2^{4}$ - ***9 régions***

(f) $\lambda = \lambda^{+}(I)/2^{5}$ - ***19 régions***

(g) $\lambda = \lambda^{+}(I)2^{6}$ - ***32 régions***

(h) $\lambda = \lambda^{+}(I)/2^{7}$ - ***53 régions***

(i) $\lambda = \lambda^{+}(I)/2^{8}$ - ***125 régions***

figure B.4.2

Segmentations de parcelles cultivées (BD ORTHO, résolution : 50 cm). Voir texte.

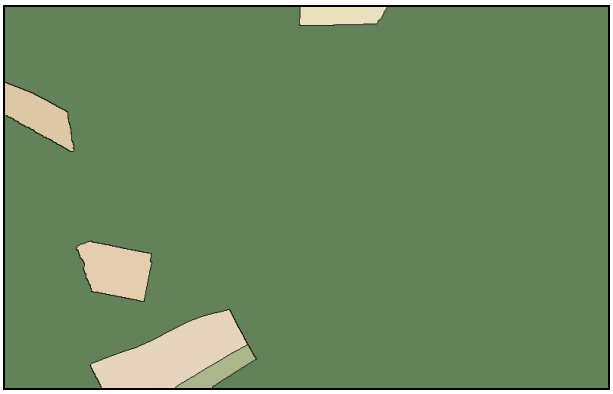
La figure B.4.3 (page suivante) illustre le comportement de l'algorithme sur une portion de territoire plus importante (1 600 x 1 000 m^2). Pour des raisons d'efficacité, l'image, également issue de la BD ORTHO, a été sous-échantillonnée à un mètre avant segmentation.

Remarquons ici la robustesse de la méthode y compris pour des objets de très grande taille relativement à la taille du pixel, tel que le village. La méthode d'optimisation par régularisation progressive de l'énergie permet en effet d'atteindre des solutions satisfaisantes pour les grandes valeurs du paramètre d'échelle, qui sont bien entendu les plus difficiles à obtenir par minimisation directe de l'énergie réglée à grande échelle (globalement, plus l'échelle augmente, plus des minima locaux d'énergie apparaissent).

Notons également qu'une simple modélisation constante par morceaux permet tout de même de trouver des unités très texturées (village, forêt…) pour les grandes valeurs du paramètre d'échelle, c'est-à-dire lorsque l'on relâche la contrainte sur la précision d'approximation ou de façon équivalente que l'on renforce la contrainte sur la simplicité du modèle recherché. Ce point provient du principe de relativité qui est au cœur des approches par optimisation : pour les objets texturés, l'approximation par une constante est évidemment très mauvaise dans l'absolu, toutefois si deux textures adjacentes ont des moyennes différentes, alors à grande échelle (faible complexité), les modéliser par deux morceaux constants distincts est plus fidèle que toute autre solution.

En examinant les différentes sections de la figure B.4.3, on constate qu'une description correcte du parcellaire peut être élaborée en mélangeant des objets appartenant à différentes échelles. Nous n'avons trouvé qu'une seule erreur de délimitation du parcellaire sur cette image, qui est cerclée en rouge sur la section d : le champ vert foncé dont le coin supérieur est très clair n'est jamais délimité en une seule pièce, sa partie claire est rattachée au champ voisin en priorité.

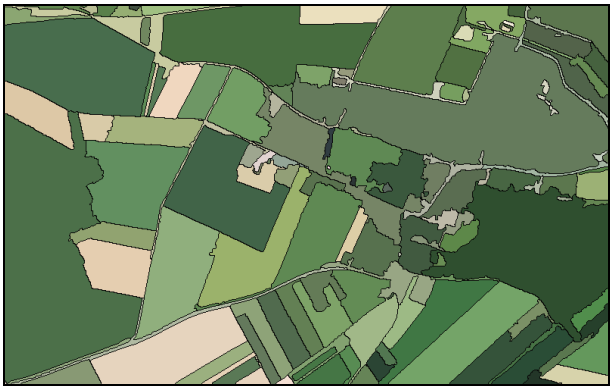
(a) *image d'origine (1 600 x 1 000)*



(b) $\lambda = \lambda^{+}(I)/4$ ***- 6 régions***

(c) $\lambda = \lambda^{+}(I)/4^{2}$ ***- 24 régions***

(d) $\lambda = \lambda^{+}(I)/4^{3}$ ***- 59 régions***



(e) $\lambda = \lambda^{+}(I)/4^{4}$ ***- 154 régions***

(f) $\lambda = \lambda^{+}(I)/4^{5}$ ***- 659 régions***

(g) $\lambda = \lambda^{+}(I)/4^{6}$ ***- 2 185 régions***

(h) $\lambda = \lambda^{+}(I)/4^{7}$ ***- 5 427 régions***

figure B.4.3

Modélisation constante par morceaux à différentes échelles d'une scène rurale (BD ORTHO sous-échantillonnée à un mètre). Voir texte.

Applications

L'approche multi-échelles de la segmentation d'images proposée est relativement générale. Elle s'appuie sur une formulation par optimisation qui englobe la plupart des cadres existant (formulations variationnelles, bayesiennes, par codage minimal). En pratique, l'algorithme obtenu est absolument sans paramètre une fois un couple d'énergies et une segmentation initiale fine choisis. Il est relativement efficace et produit des solutions robustes, robustesse qui est intimement liée aux qualités d'invariance de la méthode.

Cette méthode a été exploitée de différentes manières par différents chercheurs du laboratoire MATIS. La deuxième partie de l'article décrit ces différentes applications.

Saisie semi-automatique de la couche arborée de la BD TOPO

(Laurent Guigues)

Une tâche de restitution comporte deux aspects principaux : une tâche de photo-interprétation et une tâche de saisie de la géométrie des objets reconnus. L'importance relative de ces deux tâches diffère selon le type d'objet à restituer. Ainsi, dans le cas de la restitution des routes, le temps de saisie est comparable à celui d'identification : aussitôt repérée, la prolongation de la route est saisie. Par contre, pour d'autres objets, le temps de saisie peut être largement prépondérant par rapport au temps de photo-identification.

C'est le cas pour la restitution des zones arborées : un bois est généralement rapidement identifié, toutefois la saisie de son contour peut être très longue, en particulier si ce contour présente de nombreuses circonvolutions. Or, si le bois est correctement segmenté par une méthode automatique, un simple clic sur l'objet permet d'en extraire instantanément la géométrie. L'aspect géométrique de la saisie est alors automatisé, l'aspect photo-identification restant du ressort d'un opérateur. S'appuyant sur cette idée, nous avons développé un outil de saisie interactive de surfaces s'appuyant sur une segmentation multi-échelles. Cet outil est à la base de la méthode actuelle de production de la couche arborée de la base de données topographiques de l'IGN (BD TOPO).

L'idée de s'appuyer sur une segmentation automatique pour faciliter la saisie de surfaces n'est pas nouvelle, toutefois, comme nous l'avons amplement discuté ci-dessus, si l'on se cantonne à une analyse à une seule échelle fixée *a priori*, certaines zones d'intérêt se trouvent inévitablement sur ou sous-segmentées. Une faible sur-segmentation ne pose pas de problème : si un objet est divisé en quelques régions (en faible nombre), alors quelques clics permettent de le reconstituer rapidement.

Le temps de sélection est évidemment d'autant plus important que la sur-segmentation est forte et l'intérêt d'une saisie orientée régions est perdu s'il faut systématiquement regrouper manuellement un nombre important de zones pour parvenir aux objets recherchés (à l'extrême, s'appuyer sur une division en pixels n'a bien entendu aucun intérêt). Toutefois, le problème essentiel qu'il y a à ne considérer qu'une description à échelle fixe réside dans les risques de sous-segmentation : si une frontière qui nous intéresse n'existe pas dans la partition, la méthode par sélection de régions achoppe car aucune union de régions existantes ne permet de décrire les objets d'intérêts. La faisabilité et l'efficacité d'une saisie par sélection de régions repose donc sur la capacité à se placer systématiquement à un niveau de *faible sur-segmentation* (ou de segmentation correcte) par rapport aux objets d'intérêt.

Le caractère multi-échelles de notre approche permet naturellement de gérer ces contraintes en permettant le réglage *interactif* du niveau de segmentation. En outre, des expérimentations sur d'importants jeux de données ont permis de montrer la fiabilité de la méthode dans le cas des surfaces de végétation arborée : elle permet pratiquement toujours d'obtenir - à leurs échelles propres - les zones arborées en une seule pièce. Toutefois, une description ensembles-échelle complète d'une image de taille honorable est relativement longue à calculer et coûteuse en mémoire. En outre, les échelles correspondant à des sous-segmentations des zones d'intérêt n'ont pas d'utilité (la description d'un département entier en quelques régions n'a par exemple aucun intérêt du point de vue de la BD TOPO). Finalement, l'intérêt d'une saisie orientée régions est largement diminué si un temps important est consacré à la navigation en échelle. Après différents essais, il s'est avéré que seulement trois sections bien choisies étaient suffisantes pour la saisie des zones arborées à partir de la BD ORTHO.

Des tests sur un panel varié de paysages ont permis de sélectionner trois échelles significatives de description : une échelle à laquelle les arbres isolés sont systématiquement individualisés, une échelle moyenne (haies, bosquets…) et une grande échelle, à laquelle les grandes unités forestières sont agglomérées (à cette échelle apparaissent également d'intéressantes généralisation des zones de végétation clairsemée). Les escalades ne sont donc pas calculées jusqu'à fusion entière de l'image, mais arrêtées à l'échelle la plus grossière qui nous intéresse.

Concrètement, la production est organisée en chantiers départementaux et se divise en trois étapes :

1. segmentation automatique de la BD ORTHO départementale et structuration des données du chantier ;
2. saisie interactive grâce à un logiciel développé spécifiquement ;
3. vectorisation automatique des contours des zones saisies et intégration à la BD TOPO.

Les étapes 1 et 3 sont complètement automatiques. L'étape de segmentation et de création d'un chantier prêt pour la saisie nécessite simplement la spécification d'un (ou plusieurs) emplacement d'images (e.g. un DVD BD ORTHO), éventuellement

distants. Le calcul de segmentation est effectué à résolution métrique et divisé en dalles kilométriques, et peut être distribué sur plusieurs ordinateurs (calcul distribué par le logiciel *pvm* (parallel virtual machine)). Les premiers calculs se sont répartis sur douze MacIntosh G4 bi-processeurs à un Ghz.

Dans ces conditions, la segmentation d'un département français moyen (environ 6 000 km^2), soit l'équivalent d'une image de 100 000 par 100 000 pixels, demande environ deux jours de calcul (soit environ cinq minutes par kilomètre carré et par processeur).

Une fois la segmentation calculée, un programme de structuration de chantier prépare les données pour la saisie. Grâce à des formats de codage adéquat des données (compression en ondelettes pour les images (format ECW d'ERmapper), codage RLE (Run Length Encoding), graphe d'adjacence de régions et arbre d'inclusion pour les segmentations), il est possible de gérer la navigation dans des chantiers de taille arbitraire : seules les données de la vue courante sont chargées à la résolution courante et les décompressions peuvent s'effectuer à la volée de manière fluide.

Chaque opérateur a en charge la saisie d'un département, qu'il balaye systématiquement pour saisir les zones arborées. Outre le simple clic - qui s'avère inefficace en pratique - les zones peuvent être sélectionnées de différentes manières (tracé continu, « lasso », rectangle…). L'échelle et la résolution de saisie peuvent être adaptées dynamiquement (navigation espace-résolution-échelle). Les grandes unités arborées peuvent ainsi être très rapidement saisies à faible résolution (dix ou vingt mètres) et échelle grossière (la géométrie des objets est bien entendue toujours restituée à la précision de la segmentation, i.e. au mètre). Les objets fins peuvent ensuite être acquis à forte résolution et échelle fine ou moyenne. Une vue générale du chantier permet de naviguer et suivre l'avancement global de la saisie.

Notons qu'une telle méthode garantit :

- la cohérence topologique et géométrique des données saisies ;
- la cohérence géométrique fine des données saisies avec le fond ortho-photographique ;
- le respect des spécifications de saisie grâce à des mécanismes :
    - de remplissage des clairières de surface inférieure aux spécifications (600 m^2) :
    - d'alerte visuelle puis suppression des zones arborées de surface inférieure aux spécifications (80 m^2) ?

Seule l'exhaustivité ne peut bien entendu pas être garantie automatiquement et doit faire l'objet d'un contrôle qualité *a posteriori.*

Dix départements sont en cours de saisie par cette méthode. Le temps de saisie moyen par département est estimé à deux ou trois mois/opérateur, le coût principal résidant bien entendu dans la saisie des objets de petite taille et épars (arbres isolés, bosquets, haies). Les zones urbaines ou les paysages de bocage sont ainsi parmi les plus longs à restituer. En dehors des gains de productivité, reléguer la description géométrique des objets à une méthode automatique induit des gains importants sur la qualité et l'homogénéité des données produites : description fine y compris des objets les plus complexes, en parfaite cohérence avec l'image et de qualité homogène sur l'ensemble du territoire. Notons également que la même méthode permet d'effectuer les mises à jour de la base (segmentation des nouvelles images et initialisation du chantier de mise à jour à partir de l'ancienne base).

La principale perspective d'amélioration de l'outil consiste en l'ajout d'un module de classification automatique s'appuyant sur un apprentissage incrémental : une base d'exemples des surfaces d'intérêt peut en effet être constituée au fur et à mesure de la saisie. Cette base peut alors servir à classer automatiquement les zones non encore inspectées. L'outil de saisie est par ailleurs directement utilisable pour la restitution d'autre classes d'objets surfaciques que les zones arborées.

Appariement automatique cadastre-image pour la mise à jour de bases de données d'occupation du sol

(Roger Trias-Sanz)

La méthode de segmentation multi-échelles a également été exploitée dans le cadre d'une thèse sur l'interprétation d'occupation du sol par utilisation conjointe de photographies aériennes numériques et de données parcellaires, visant à obtenir automatiquement des données d'occupation du sol en zones agraires à partir de l'information photographique (BD ORTHO) et de l'information cadastrale vectorisée du Référentiel à Grande Échelle (RGE). L'approche proposée consiste à s'appuyer sur l'information fiscale fournie par le cadastre pour en dériver, par appariement avec l'image et classification, une information d'occupation du sol. Dans ce contexte, il est nécessaire d'apparier le parcellaire cadastral avec l'image, ce qui implique i) de déterminer quelles limites cadastrales correspondent à des limites physiques d'occupation du sol et ii) de recaler précisément ces limites sur les limites physiques, en particulier pour pouvoir effectuer par la suite une classification fiable des contenus des parcelles.

Pour cela, on a besoin d'extraire automatiquement la position des limites sur l'image des champs, routes, arbres, bâtiments et d'autres objets. Typiquement, on ferait ceci avec un algorithme classique de détection de contours. Un des plus utilisés, celui de Canny-Deriche [DERICHE 87], donne, pour une image type comme celle de la figure B.4.4 (page suivante), les résultats montrés dans la figure B.4.5 (page suivante).

Mais ces algorithmes ont deux problèmes. D'une part, ils sont généralistes, c'est-à-dire qu'ils sont conçus pour travailler sur tout genre d'image. Ceci a son intérêt, mais bien souvent, en utilisant des techniques plus adaptées au problème concret que l'on veut traiter, les résultats sont meilleurs. D'autre part, ces algorithmes effectuent un analyse « mono-échelle », c'est-à-dire qu'il faut d'abord choisir un niveau de détail - Est-ce que l'on veut repérer les limites d'une vigne, de chaque rangée de ceps ou plutôt les limites de chaque cep individuel ? - Puis ils fournissent les contours (les limites d'objets) qui existent à ce niveau de détail. Or, en pratique, on ne sait pas *a priori* quel est le bon niveau de détail pour l'analyse d'une image et en fait on est souvent intéressé par plusieurs niveaux de détail à la fois.

L'algorithme de L. Guigues résout ces problèmes car, d'une part, sa fonction d'énergie - qui détermine la forme des régions trouvées - peut être modifiée et adaptée à chaque problème. Dans notre cas, nous avons adapté l'algorithme pour qu'il considère des zones texturées - par exemple une forêt - comme des zones homogènes (nous ne nous intéressons pas aux limites entre les arbres individuels d'une forêt), et aussi pour qu'il privilégie les régions qui ont une forme proche de celle d'une parcelle type : là où un algorithme typique a tendance à trouver des régions arrondies, celui-ci cherchera plutôt des rectangles. D'autre part, l'algorithme de L. Guigues est intrinsèquement « multi-échelles », ce qui veut dire qu'il analyse l'image à tous les niveaux de détail à la fois.

figure B.4.4
Image de départ

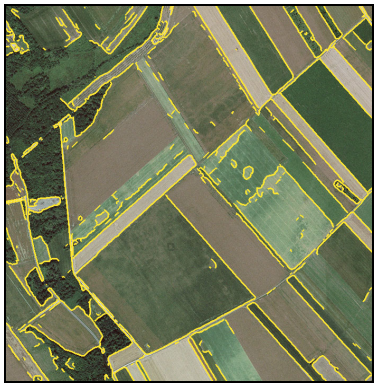


figure B.4.5
Détecteur de Canny-Deriche

figure B.4.6
Hiérarchie aplatie

Cependant, le résultat de cet algorithme est une hiérarchie de régions possédant une structure emboîtée difficile à utiliser dans notre cas. Pour nous affranchir de ce problème, nous procédons à l'*aplatissement* de la hiérarchie produite, de la manière suivante : quand, en descendant dans la hiérarchie, une région se découpe en deux, il apparaît une frontière entre les deux nouvelles régions, et cette frontière se conserve si on continue de descendre dans la hiérarchie.

Pour aplatir la hiérarchie, nous considérons donc toutes les limites des régions trouvées - à tous les niveaux de la hiérarchie - et examinons à quel niveau de la hiérarchie chaque limite apparaît. Nous représentons le résultat comme dans la figure B.4.6 (ci-dessus). Les traits les plus clairs représentent des limites qui apparaissent le plus haut dans la hiérarchie, et donc représentent des limites trouvées à un niveau de détail grossier et les traits les plus foncés apparaissent le plus bas dans la hiérarchie et représentent des limites à un niveau de détail plus fin.

Nous pouvons maintenant aborder le problème du recalage du cadastre. Nous le résolvons de la façon suivante : tout d'abord, nous affectons chaque région élémentaire de la hiérarchie aplatie (figure B.4.6, nous les appelons *régions de segmentation*) à la parcelle cadastrale qui est la plus proche. Ensuite, nous imposons que deux régions de segmentation qui sont voisines et qui sont affectées à la même parcelle cadastrale soient séparées par des limites moins saillantes (en foncé sur la figure B.4.6), et que deux régions qui sont affectées à des régions cadastrales différentes soient séparées par des limites plus significatives (en clair sur la figure B.4.6).

Nous utilisons alors une méthode de *relaxation probabiliste* pour modifier l'appariement initial entre régions de segmentation et parcelles de cadastre de façon à préserver au mieux les conditions qui ont été imposées. Le résultat pour la portion de cadastre de la figure B.4.7 (page suivante) est présenté en figure B.4.8 (page suivante). On constate que la disposition générale des parcelles cadastrales y est préservée, mais que les limites de parcelles ont été recalées pour correspondre à de vraies limites dans l'image. De plus, en calculant la saillance moyenne de chaque limite cadastrale recalée, on obtient un bon indicateur de la plausibilité image de chaque limite - les limites les plus saillantes sont montrées en jaune ou vert sur la figure B.4.8, et les moins saillantes en cyan, bleu et magenta. Les limites peu saillantes ont des fortes chances de ne correspondre à aucune réalité-terrain.

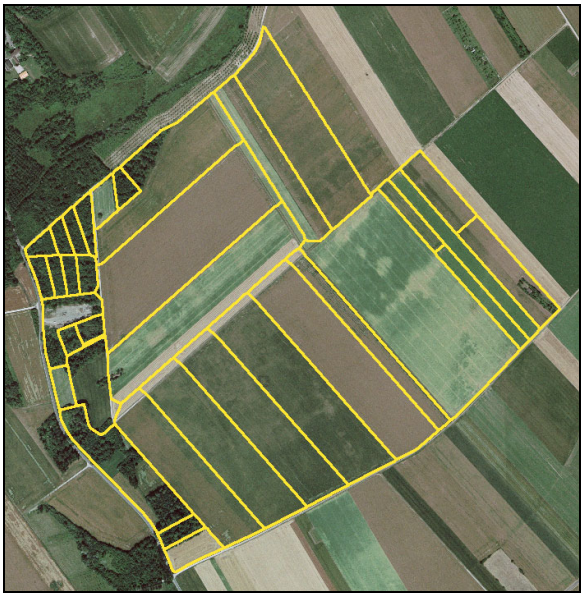


figure B.4.7 *: cadastre original*

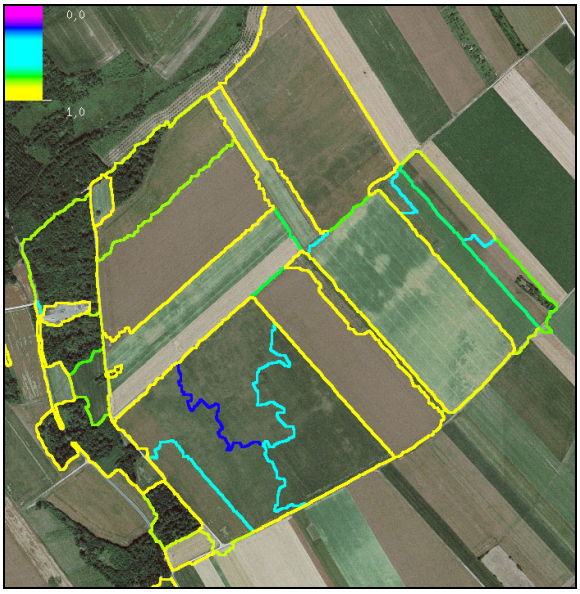


figure B.4.8 *: cadastre recalé*

Cette première étape de recalage nous sert alors de base pour la classification des parcelles et, en particulier, pour décider si une parcelle correspond à un type d'occupation du sol homogène.

Détection et reconstruction de facettes 3D par appariement de hiérarchies de régions

(Nesrine Chehata)

Dans le cadre d'une thèse cofinancée par l'IGN et le CNES, nous nous intéressons aux images des futurs satellites THR (Très Haute Résolution) et à leur intérêt pour la reconstruction et l'interprétation de scènes urbaines.

Dans un premier temps, notre travail s'est focalisé sur la reconstruction de bâtiments. Dans ce cadre, nous avons proposé une méthode de détection de facettes 3D correspondant aux toits de bâtiments dans un couple d'images stéréo-scopiques qui s'appuie sur une approche par appariement de régions et dont le schéma global est illustré figure B.4.9 (page suivante).

Trois grandes parties se détachent : la segmentation, la mise en correspondance des régions et la reconstruction des facettes 3D. Dans un premier temps, des segmentations hiérarchiques sont calculées sur les images par l'algorithme d'escalade. Les régions des deux hiérarchies sont ensuite appariées. Finalement, une description en facettes est obtenue par recherche de deux coupes des hiérarchies dont le score total d'appariement mutuel est maximal et qui respectent des contraintes de planéité des facettes. Détaillons maintenant chacune de ces étapes.

Segmentation

Disposant de deux images différentes d'une même scène, il est très difficile voir impossible d'obtenir deux partitions automatiques dont les régions se correspondent bijectivement : on obtient systématiquement des différences de degré de découpage à certains endroits de la scène. Pour pallier à ce problème, nous proposons d'utiliser des segmentations hiérarchiques qui permettent d'avoir plusieurs niveaux d'interprétation de la scène (pixel, toit, bâtiment…) et rendent donc les appariements inter-niveaux possibles. Il suffit, dans ce cas, que deux régions qui se correspondent apparaissent à deux valeurs quelconques du paramètre d'échelle pour qu'elles puissent être appariées. De plus, dans le contexte satellitaire, compte tenu du faible rapport B/H du couple, les distorsions ainsi que les parties cachées sont réduites entre les deux images et nous avons constaté que les segmentations obtenues par escalade sont assez similaires. Les énergies employées pour la segmentation sont issues du formalisme du codage. Elles comportent une énergie de type codage polygonal pour l'énergie de complexité géométrique et une énergie correspondant au coût d'un codage selon une loi gaussienne i.i.d. des valeurs des pixels dans chaque région pour l'aspect radiométrique, Cf. [GUIGUES 03a].

Mise en correspondance des régions

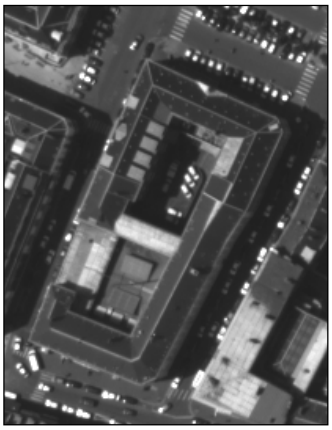
Plusieurs contraintes classiques sont utilisées pour l'appariement de régions. Tout d'abord, une contrainte de taille minimale et maximale permet d'élaguer des nœuds de la hiérarchie qui ne sont pas susceptibles de représenter des facettes d'intérêt. Ensuite, des contraintes épipolaires et altimétriques sur les barycentres des régions sont utilisées.

Un deuxième intérêt à avoir une description multi-échelles consiste à pouvoir propager les contraintes de manière ascendante, de bas en haut de la hiérarchie, ce qui rend l'algorithme plus robuste au bruit. D'autres contraintes sont aussi utilisées tel que des contraintes de recouvrement et de similarité de forme entre régions (Cf. article B.3, « *Interprétation de scènes urbaines à partir d'images satellitaires THR : reconstruction de facettes 3D et optimisation globale 3D* », pages 29-40).

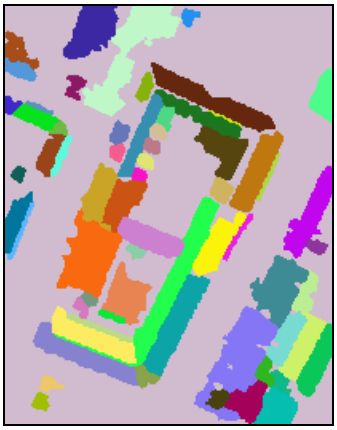
Coupe optimale dans les deux hiérarchies

Une fois les appariements de régions obtenus, nous recherchons une coupe simultanée des deux hiérarchies qui maximise les scores d'appariement de régions et respecte la planéité des facettes. Cette coupe se fera à différents niveaux des hiérarchies pour ne garder que les meilleures facettes. Les résultats de cette coupe conjointe sont présentés dans la figure B.4.10, ci-dessous, sur un bâtiment d'Amiens à 45 cm et un faible rapport B/H = 0,2. Une pré-classification grossière sol/ sursol élimine les régions au sol. Les régions appariées sont représentées avec la même couleur dans les deux images. Sur quatre couples différents, le taux de détection de facettes valides est de 75%. Les toits manquants correspondent à 14%.

a - image gauche initiale



b.1- image gauche



b.2- image droite

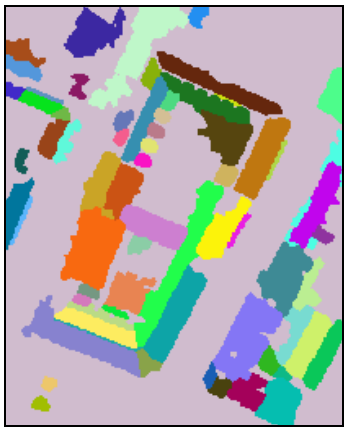


figure B.4.10 *: Amiens 45 cm, B/H = 0,2*

Conclusion

Les principaux avantages de cette approche consistent, tout d'abord, à tirer profit du faible rapport B/H des couples traités et donc d'essayer d'apparier des segmentations d'images qui sont *a priori* assez semblables. Le fait d'utiliser une segmentation hiérarchique permet d'avoir plusieurs niveaux d'interprétation de la scène ce qui est très important pour évaluer les possibilités et la précision de reconstruction sur des images satellites THR. Les hiérarchies permettent, en outre, de propager de manière ascendante les contraintes ce qui rend les algorithmes plus robustes au bruit. Les facettes obtenues sont alors utilisées dans un schéma d'optimisation globale de la scène en 3D.

Segmentation d'images de distance en facettes planes

Les deux dernières applications décrites portent sur l'extraction de facettes planes dans un environnement « structuré » (paysage urbain vu d'avion ou édifices architecturaux vus du sol), à partir d'images de distance (Modèle Numérique de Surface (MNS) ou points laser). Placées dans des contextes différents, elles utilisent des critères de cohérence radiométriques ou géométriques intégrés dans le formalisme de L. Guigues pour réaliser la segmentation de l'image de distance. Toutes ces applications tirent parti de l'analyse multi-échelles inhérente aux travaux de L. Guigues pour fournir des représentations à des niveaux d'interprétation différents. On notera également que dans tous les cas, cette segmentation est un préalable à une interprétation de plus haut niveau de la scène : elle constitue une étape de « bas niveau » indispensable pour des processus ultérieurs.

Segmentation de Modèles Numériques de Surface en facettes planes pour la modélisation de scènes urbaines

(Franck Taillandier)

Depuis quelques années, les Modèles Numériques de Surface (MNS) sont devenues des produits classiques pour la modélisation tridimensionnelle. Créés automatiquement par corrélation à partir d'images aériennes ou obtenus par des techniques actives telles que le laser aéroporté, ils fournissent une représentation maillée du terrain sous forme de grilles d'altitudes et sont à la base d'un grand nombre d'algorithmes de caricature de surface, de reconstruction de bâti ou de détection de changements.

Un MNS reste toutefois une donnée raster et n'apporte aucun information de structure. Pour la plupart des applications, une étape de détection et d'extraction d'éléments pertinents est indispensable : dans le cas de zones urbaines denses, on se focalise principalement sur des *facettes planes aux formes simples*. Dès que l'on s'intéresse à de l'interprétation de scène, la question de l'échelle d'étude se pose immédiatement : le niveau de détail requis peut être le chien assis, le pan de toit, voire le bâtiment dans son ensemble. À ces problèmes d'échelle, l'algorithme d'escalade fournit une solution élégante par son analyse intrinsèquement multi-échelles et la représentation hiérarchique afférente.

Afin de tenir compte des délocalisations et d'erreurs en particulier au niveau des discontinuités altimétriques (façades) des MNS ainsi que pour pouvoir intégrer des contraintes liées à des détecteurs externes (segments 3D), nous proposons de réaliser la segmentation *couplée* du MNS et de l'ortho-image de gradient contrainte dérivée des travaux de D. Boldo [BOLDO 02]. Nous rechercherons, de fait, les *facettes planes et homogènes aux formes simples*.

Techniquement, nous écrirons ainsi pour une partition P du MNS et de l'ortho-image de gradient la fonctionnelle que nous cherchons à minimiser sous la forme :

$$E(P) = \sum_{R \in P} C(R) + \lambda\left(D_1(R) + \beta D_2(R)\right).$$

La somme se fait sur l'ensemble des régions de la partition P. Le premier terme $C(R)$ est un coût de codage de la forme de la région qui pénalise les régions aux contours complexes. Le deuxième terme $D_1(R)$ traduit l'écart de la région à une surface plane calculée par estimation robuste sur le MNS. Enfin, le dernier terme $D_2(R)$ calculé *via* l'ortho-image de gradient pénalise les régions inhomogènes, Cf. [TAILLANDIER et al 03]. Le paramètre β règle l'apport respectif des deux types de données. Le paramètre λ correspond au paramètre d'échelle de la formulation de L. Guigues. On notera que la suppression du terme $D_2(R)$ permet d'obtenir une segmentation d'un MNS en facettes planes sans information image.

Nous illustrons ici le fonctionnement de l'algorithme sur la même zone que celle présentée en figure B.4.10 (toutefois les données initiales qui ont servi au calcul de l'ortho-image de gradient et du MNS ne sont pas des images satellitaires THR mais des images aériennes numériques en multi-recouvrement). La figure B.4.11 (ci-dessous) présente l'ortho-image de gradient sur laquelle des segments 3D ont été projetés pour imposer des contraintes au cours de la segmentation. C'est une segmentation en ligne de partage des eaux de cette image représentée en surimpression sur le MNS dans la figure B.4.12 (ci-dessous) qui servira de sur-segmentation de base à l'algorithme. La figure suivante présente plusieurs segmentations à des échelles différentes. On notera le gain apporté par l'ortho-image de gradient et tout spécialement les contraintes dans la délimitation des facettes planes. La figure B.4.14, page suivante, présente un résultat tridimensionnel sur une zone de focalisation.

figure B.4.11

Ortho-image de gradient contrainte par des segments 3D.

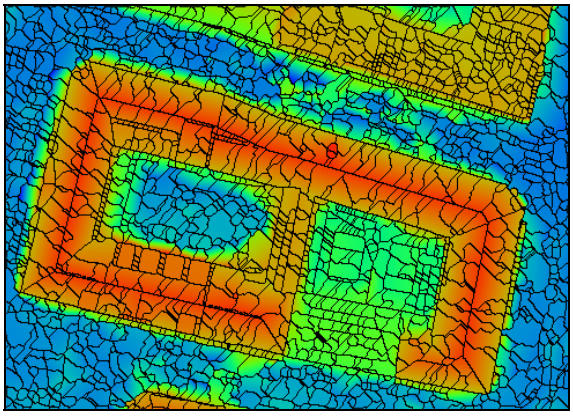


***figure B.4.12** : sur-segmentation initiale surimposée sur le MNS à segmenter.*

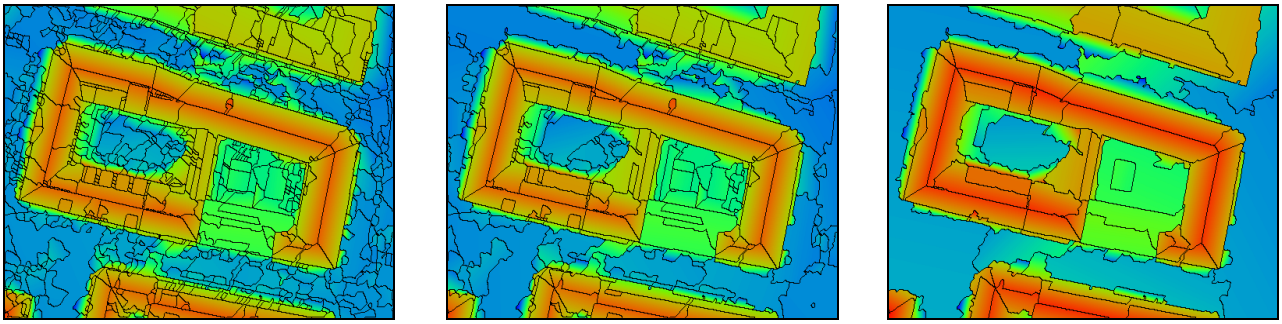


figure B.4.13

Segmentations à différentes échelles (λ = 1,2 et 4 respectivement).

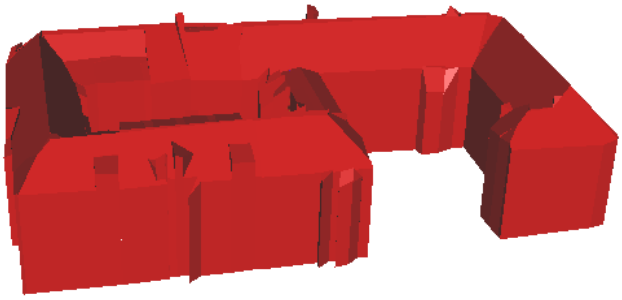


figure B.4.14

Exemple de modèle 3D obtenu sur une zone de focalisation

Les résultats illustrent l'intérêt du couplage des données radiométriques et géométriques pour une bonne segmentation d'un MNS en facettes planes. Le principal problème de cette approche réside dans le choix du paramètre de pondération β entre les deux types de données qui ne correspond pas à une échelle, lui ….

Segmentation en facettes planes, scènes à grande échelle

(Matthieu Deveau)

Nous nous sommes appuyés sur les travaux de L. Guigues dans le cadre d'une thèse dont le sujet est la reconstruction 3D d'édifices remarquables (voir article B.2 : « *Modélisation 3D automatique terrestre d'environnements urbains et complexes à très grande échelle* », pp. 21-28. Nous cherchons à réaliser une partition de la scène qui permette d'isoler les différentes structures d'un monument. La configuration étudiée met en œuvre une acquisition par scanner à balayage laser terrestre et une photographie numérique, pris de deux points de vue proches. La mise en place des données permet de travailler dans une géométrie commune : à une région définie dans l'image correspond un ensemble de points 3D représentant la surface de l'objet considéré. Nous disposons donc à la fois d'information radiométrique et d'information géométrique. Nous souhaitons exploiter à la fois les indices présents dans ces deux espaces pour la reconstruction. La méthode présentée ici se focalise, dans un premier temps, sur la seule utilisation de la géométrie dans la construction de la hiérarchie.

En pratique, l'énergie D d'attache aux données est modifiée pour non plus favoriser l'homogénéité radiométrique mais la 'proximité' géométrique des points à une primitive : le plan. L'analyse en composantes principales (ACP) se révèle, dans cette problématique, un outil simple et rapide pour qualifier la planéité d'un groupe de points. En effet, en supposant que la région considérée soit de type planaire, les points 3D lui appartenant suivront approximativement l'équation d'un plan. Leur variance dans la direction de la normale au plan sera beaucoup plus faible que dans la direction orthogonale. En particulier dans le contexte « terrestre », la densité spatiale des points et la diminution du bruit par la multiplication des mesures en chaque point apportent une grande fiabilité à l'estimation des plans. Il nous est donc possible de qualifier la planéité de la région en utilisant comme critère la plus petite valeur propre de la matrice de covariance associée au nuage de points. De plus, il s'agit d'une matrice de taille modeste (3 x 3), dont les termes sont facilement mis à jour lors de la fusion de deux régions par une simple somme terme à terme.

Les résultats présentés (figure B.4.15, page suivante) proposent une coupe de la hiérarchie non pas à λ constant mais suivant un seuil relatif à la variance de la région. Une voie consisterait à réaliser, après la construction de la hiérarchie par calcul de variance, une estimation robuste d'un plan sur chaque région (Cf. Franck Taillandier, ci-dessus) puis à effectuer la coupe par rapport à la somme des résidus au plan. Ainsi, serait tiré partie de la capacité de la segmentation hiérarchique à réduire l'espace de recherche et du contenu géométrique présent dans chaque région.

Notons aussi les effets apparaissant au niveau des discontinuités. Leur origine réside dans le choix de la sur-segmentation initiale, obtenue par division de l'image en dalles régulières de taille 2 x 2 - trois points étant nécessaires pour le calcul d'un plan. Pour palier ce problème, plusieurs pistes sont examinées : une segmentation initiale formée par ligne de partage des eaux (*watershed*) sur l'image radiométrique, ou par agrégation des pixels contigus (*clustering*) sur un critère de régularité des normales estimées en chaque point sur un voisinage adaptatif.

À titre indicatif, une segmentation de l'image radiométrique (figure B.4.16, page suivante) est proposée. L'objectif est bien de combiner l'information issue des deux capteurs pour aider la reconstruction. Nous envisageons notamment de travailler sur une segmentation hiérarchique de l'image radiométrique suivie de la recherche de la meilleure coupe au sens des résidus au plan estimé en chaque région.

Cette approche aurait notamment trois avantages :

- l'absence de paramètre de pondération entre les données radiométriques et les données géométriques dans l'énergie d'attache aux données ;

- la dissociation du support de construction de la hiérarchie et du critère de choix de la coupe. L'écueil consistant à bâtir la hiérarchie en introduisant une information géométrique et de déterminer la meilleure coupe par rapport à la même information serait alors évité ;
- l'exploitation, dans notre configuration de travail, de la résolution plus forte de l'image par rapport à la numérisation laser et donc d'une meilleure localisation des frontières des régions.

Enfin, parmi les développements/utilisations envisagés se trouve la sélection de modèles au sein de la segmentation hiérarchique. Moins ambitieuse que l'extension multi-dimensionnelle de la segmentation évoquée par L. Guigues dans sa thèse, cette approche s'appuierait sur l'espace de travail que constitue la hiérarchie pour choisir quel modèle (plan, cylindre, autre surface) est la plus appropriée pour décrire l'objet considéré.

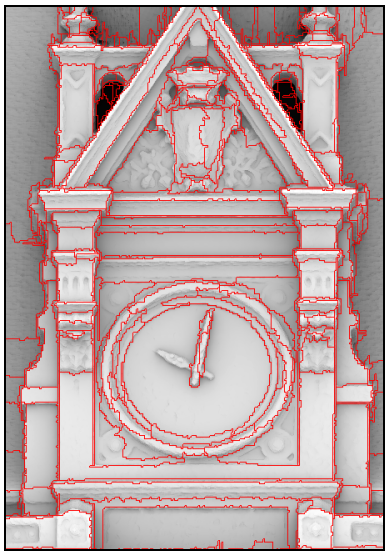


figure B.4.15

Segmentation en plan par ACP.

Coupe selon la variance.
Support de représentation : image d'ombrage.

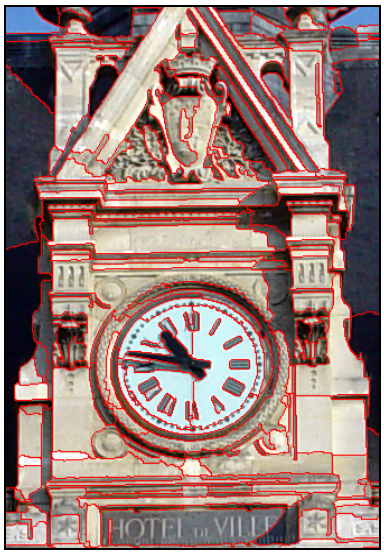


figure B.4.16

Segmentation radiométrique.

Coupe à λ donné.
Support de représentation : image radiométrique.

Conclusion générale

Cet article a décrit une approche originale de la segmentation d'images, qui met en avant le rôle fondamental d'un facteur inhérent à toute action de description ou de modélisation de données : le facteur d'échelle. Nous avons montré qu'un tel facteur apparaît au cœur même des formalisations mathématiques du problème de modélisation optimale et que lorsque l'on s'intéresse à la modélisation par morceaux de données, i.e. à la segmentation, alors un cadre hiérarchique permet d'obtenir une équivalence entre les deux principales idées associées à l'échelle : l'idée de *précision* de modélisation et celle de *finesse/complexité* de modélisation. Le cadre hiérarchique permet alors de développer des analyses multi-échelles complètes des données et conduit à un algorithme efficace d'approximation des solutions de problèmes classiques de partitionnement par minimisation d'énergie.

Plusieurs exemples d'application ont illustré la pertinence d'une approche multi-échelles en segmentation (suppression de tout paramètre, possibilité d'introduire des critères de décision fiables *a posteriori*, réglage interactif, adaptation locale du niveau de description, etc). Outre les applications décrites ici, l'approche proposée pourrait également avoir des applications dans le domaine de la compression d'images orientés régions ainsi qu'en indexation de bases de données d'images pour la recherche par le contenu ou par similarité.

Références

[BEUCHER, LANTUEJOUL 79] S. Beucher and C. Lantuejoul : *Use of watersheds in contour detection,* in Proceedings of International Workshop on Image Processing, Real-time Edge and Motion Detection/Estimation, Rennes (France), 1979.

[BLAKE, ZISSERMAN 87] A. Blake and A. Zisserman : *Visual Reconstruction*, MIT Press, Cambridge, MA, 1987.

[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, directeurs de thèse : G. Stamon & H. Le Men, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-02-003-C-THE-DB, soutenue le 14 juin 2002.

[DERICHE 97] R. Deriche : *Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector,* in International Journal of Computer Vision, 1(2), pp. 167-187, 1987.

[GEMAN, GEMAN 84] D. Geman and S. Geman : *Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images,* IEEE Trans, On Pattern Analysis and Machine Intelligence 6(6), pp. 721-741, 1984.

[GUIGUES 03a] L. Guigues : *Modèles multi-échelles pour la segmentation d'images*, thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, spécialité : Traitement des images et du signal, directeur de thèse : Jean-Pierre Cocquerez, soutenue le 12 décembre 2003, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-037-C-THE-LG.

[LINDEBERG 94] T. Lindeberg : *Scale-Space Theory in Computer Vision,* Kluwer Academic, 1994.

[MUMFORD, SHAH 89] D. Mumford and J. Shah : *Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems,* Comm. On Pure and Applied Math. 17(4), pp. 577-685, 1989.

[SHANNON 59] C. Shannon : Coding *theorems for a discrete source with a fidelity criterion*, IRE Natl. Conv. Record., Part 4, pp. 142-163, 1959.

Publications

[GUIGUES et al 03a] L. Guigues, H. Le Men and J.-P. Cocquerez : *Scale-Sets Image Analysis*, in Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP'03), Barcelone (E), soumis, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-040-C-COM-LG, septembre 2003.

[GUIGUES et al. 03b] L. Guigues, H. Le Men & J.-P. Cocquerez : *Analyse ensembles-échelle d'une image*, in Actes du Colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images (GRETSI'03), Paris, France, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-031-C-COM-LG, septembre 2003.

[GUIGUES et al. 03c] L. Guigues, J.-P. Cocquerez and H. Le Men : *Scale-Sets Image Analysis*, in International Journal of Computer Vision, soumis, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-010-C-ART-LG, 2003.

[TAILLANDIER et al 03] F. Taillandier, L. Guigues and R. Deriche : *A framework for constrained multi-scale range image segmentation*, in Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP'03), Barcelone (E), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-011-C-COM-LG, septembre 2003.

[TRIAS-SANZ 03a] R. Trias-Sanz : *Locating and classifying vegetation areas in high-resolution multi-spectral aerial images with very high reliability using supplementary information : A literature review*, in Technical Report 2003/1, SIP-CRIP5 (Université de Paris-5), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-041-RAP-RTS, novembre 2003.

[TRIAS-SANZ 04] R. Trias-Sanz : *An Edge-based Method for Registering a Graph onto an Image with Application to Cadastre Registration*, in Proceedings of the 2004 Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems Conference (ACIVS 2004), pp. 333-340, Bruxelles (B), septembre 2004, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-032-C-COM-RTS, 2004.

[TRIAS-SANZ, PIERROT DESEILLIGNY 04] R. Trias-Sanz and M. Pierrot Deseilligny : *A region-based method for graph to image registration with application to cadastre data*, in Proceedings of the 2004 International Conference on Image Processing (ICIP'04), Singapore, October 2004, laboratoire MATIS, IGN-SR-04-015-C-COM-RTS, 2004.

B.5 Mesure de la déviation de la verticale par des observations astronomiques

Olivier Martin

Introduction

L'astronomie de position a souvent été utilisée afin de connaître les coordonnées d'un point dans des endroits très isolés. Outre la durée de manipulation qui occupait une bonne moitié de la nuit (pour les opérateurs les plus avertis), la précision du point mesuré dépassait rarement cinquante mètres. Avec de telles propriétés, il est évident que le GPS, qui offre de bien meilleurs résultats en quelques secondes, a complètement bouleversé la donne et provoqué sa disparition.

Pourtant, elle pourrait renaître de ses cendres avec l'apport de nouvelles technologies. Basée sur le même principe, elle permettrait de modeler le géoïde, surface souvent trop imprécise. Car, si le GPS est aujourd'hui présenté comme un appareil magique de positionnement, il ne faut pas oublier que les altitudes qu'il fournit sont prises par rapport à une surface aussi idéale que physiquement inadaptée : un ellipsoïde de référence. Et c'est en cela que l'astronomie de position peut venir en aide au GPS : le couplage de ces deux modes de mesure permet de connaître l'inclinaison de la normale au géoïde par rapport à la normale à l'ellipsoïde en un point. Cette différence angulaire s'appelle la déviation de la verticale.

Ce projet devrait permettre de densifier rapidement et précisément des maillages locaux du géoïde et d'éviter ainsi les cheminements par nivellement dans des sites isolés ou difficiles d'accès.

Définition de la déviation de la verticale

Le géoïde

Le géoïde est la surface d'équipotentielle du champ de pesanteur terrestre proche du niveau moyen des mers. Cette surface sert de référence pour les altitudes. Cette surface présente de nombreuses irrégularités qui dépendent du sous-sol. Du fait de sa complexité surfacique, il a été indispensable de calculer une surface mathématique intégrant les ondulations du géoïde : le quasi-géoïde. En France, le quasi-géoïde de référence est le QGF98, il a été réalisé par Henri Duquenne [DUQUENNE 98]. Son amplitude est d'environ 20 mètres. La résolution de ce modèle est de 1,5' en latitude et de 2' en longitude. Comme nous pouvons le constater sur la figure B.5.1, les « sommets » du quasi-géoïde se situent aux lieux correspondants aux reliefs élevés : les chaînes des Pyrénées, des Alpes et du Massif Central. De la même façon, le bassin parisien est très plat à la fois sur la carte des reliefs et du quasi-géoïde.

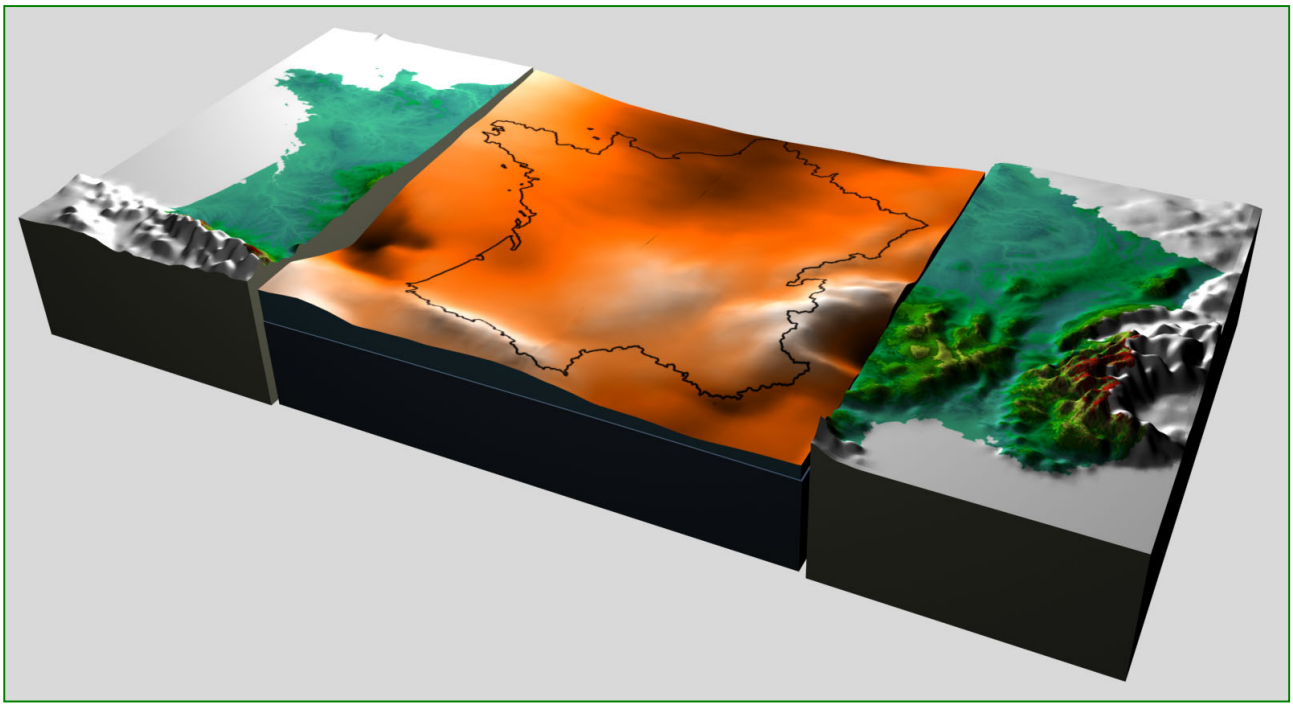


figure B.5.1

En orange : modèle 3D établi à partir du QGF98. De chaque côté : le relief de la France.
(les échelles de hauteur entre le quasi-géoïde et le relief ne sont pas respectées)

L'ellipsoïde

L'ellipsoïde est une surface purement mathématique qui ne nécessite que très peu de paramètres. Elle ne peut convenir comme surface de référence pour les altitudes, par contre elle sert de zéro pour les hauteurs GPS. Nous parlons ainsi non pas d'altitude GPS mais bien de hauteur GPS par rapport à l'ellipsoïde.

La déviation de la verticale

La déviation de la verticale est l'écart angulaire constitué de deux composantes (Nord-Sud et Est-Ouest) que fait, en un point de la surface terrestre, la normale au géoïde passant par ce point par rapport à la normale à l'ellipsoïde passant par ce même point. Cette angle est très petit, sur toute la surface terrestre, il ne dépasse pas 100" (= $4{,}85.10^{-4}$ *rad*). En France, il reste inférieur à 15" (= $7{,}27.10^{-5}$ *rad*).

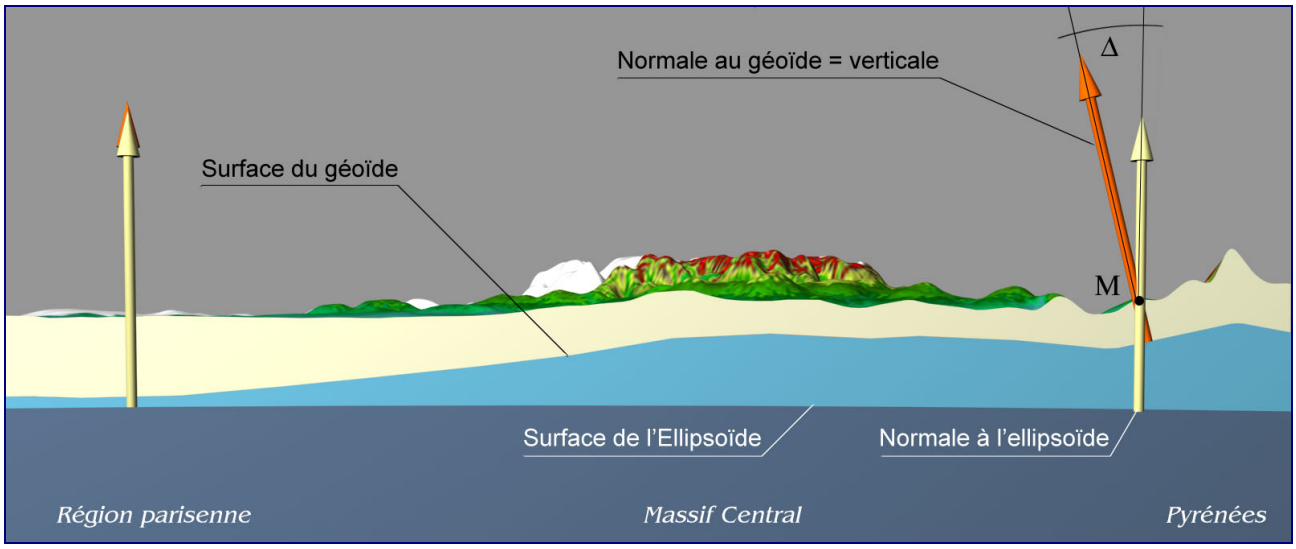


figure B.5.2

Coupe est suivant l'axe Nord-Sud de la France. Représentation du géoïde de l'ellipsoïde et de la topographie du terrain. Δ est la composante Nord-Sud de la déviation de la verticale au point M.

Intérêt de la connaissance de la déviation de la verticale

Le GPS et les altitudes

Le GPS est un moyen extrêmement pratique et rapide pour connaître sa position sur la surface terrestre. Or, de part sa conception même, il demeure incapable de fournir directement des altitudes. Afin de pallier ce problème, il a fallu réaliser des grilles de conversion qui vont nous permettre d'obtenir des altitudes à partir des données GPS. Si nous suivons la figure B.5.3, la véritable altitude est très proche de *H*. *h* est la hauteur par rapport à l'ellipsoïde donnée par le GPS. Nous pouvons alors nous rendre compte que si nous avons *h*, il nous suffit d'avoir en même temps *N*, appelé hauteur du géoïde, pour finalement obtenir *H*.

En France, la grille de conversion RAF98 (référence d'altitude française) réalisée par Henri Duquenne, permet de connaître l'altitude d'un point à partir des hauteurs GPS avec une précision de l'ordre de 2-3 cm si les mesures et traitements GPS sont de qualité suffisante.

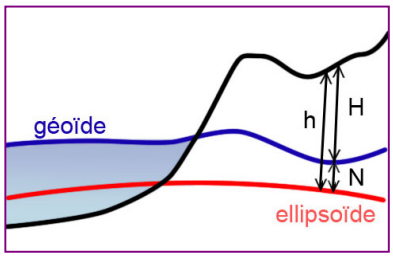


figure B.5.3 *: altitude H, hauteur ellipsoïde h et hauteur géoïde N*

L'apport de la mesure de la déviation de la verticale

Les mesures de déviation de la verticale permettraient de pouvoir affiner localement le géoïde. En effet, si nous effectuons une série de mesures régulièrement espacées selon une grille, il est alors possible de calculer un maillage qui correspondra au géoïde local.

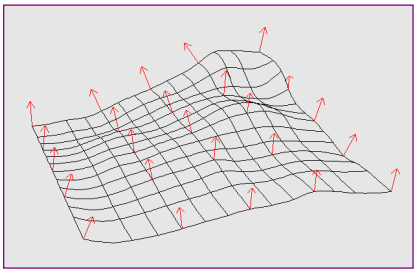


figure B.5.4

Les vecteurs rouges correspondent aux résultats des mesures de déviation de la verticale. Le maillage est le géoïde local déduit de ces vecteurs.

Les objectifs

Étant donné que nous désirons obtenir un maillage, il est nécessaire d'effectuer un nombre assez important de points de mesure de la déviation de la verticale. Chacune des mesures doit donc s'effectuer assez rapidement et le système doit être facilement transportable. Par ailleurs, la déviation de la verticale en France ne dépassant pas les 15", il est indispensable de parvenir à une précision meilleure que la seconde d'arc.

Les objectifs ont finalement été fixés ainsi :

- la manipulation doit durer moins d'une demi-heure (hors installation et mesure GPS) ;
- la précision que nous nous fixons *in fine* est le dixième de seconde d'arc ;
- le système de mesure doit être facilement transportable (dans une voiture classique) ;
- la mesure doit être automatisée.

Principe de fonctionnement

Approche théorique

Rappelons que le but est de mesurer l'angle entre la normale au géoïde et la normale à l'ellipsoïde. Pour cela, nous allons placer ces deux vecteurs par rapport à un repère fixe : le repère céleste.

- pour la normale à l'ellipsoïde : le GPS fournit les coordonnées géographiques λ_g et ϕ_g de la station. Ces dernières donnent directement la direction de la normale à l'ellipsoïde dans le repère terrestre. Ensuite, il suffit de prendre en compte les mouvements de la terre par rapport au repère céleste. Les positions du vecteur dans ce repère fixe sont ainsi calculables grâce à une connaissance précise du temps ;
- pour la normale au géoïde : ce vecteur correspond à la verticale du lieu de mise en station. Ainsi, en utilisant un appareil bullé, donc horizontal, nous possédons un plan de référence perpendiculaire au vecteur vertical. L'appareil utilisé sera un théodolite. Pour référencer ce vecteur vertical dans le repère céleste, il suffit de mesurer la position des étoiles dans le ciel.

Approfondissement

Pour bien comprendre le calcul de la déviation de la verticale, nous allons suivre trois hypothèses de départ.

Hypothèse n°1

Nous avons un théodolite parfaitement bullé, c'est-à-dire parfaitement horizontal. Ce dernier représente donc une référence parfaite pour notre verticale qui est normale au géoïde. Ce théodolite ne présente aucune imperfection : aucun défaut ni de tourillonnement, ni de collimation.

Hypothèse n°2

Nous connaissons les coordonnées astronomiques λ_a et ϕ_a du lieu de station.

Hypothèse n°3

Nous effectuons des visées à des dates très précisément déterminées. À partir des deux premières hypothèses, il est possible, grâce à un catalogue d'étoiles, de calculer la position azimutale Az_a et zénithale Dz_a de toute étoile du catalogue à un instant donné. De ce fait, en calculant la position Az_{ai}, Dz_{ai} d'une étoile *i* à l'instant t_0 et en fournissant ces coordonnées au théodolite, ce dernier visera alors parfaitement l'étoile (c'est-à-dire que l'étoile sera visible exactement au centre du champ de vision du théodolite à l'instant t_0).

Dans notre cas, nous ne connaissons pas les coordonnées astronomiques λ_a et ϕ_a du point de station, car ces coordonnées nous donne directement la verticale du lieu. Ainsi, le calcul de Az et Dz se fera pour les coordonnées géographiques λ_g et ϕ_g de mise en station ou plus exactement les coordonnées fournies par le GPS. Cette petite différence va se répercuter dans les visées effectuées par le théodolite. En effet, en conservant les hypothèses 1 et 3, nous pouvons calculer la position Az_{gi} et Dz_{gi} d'une étoile *i* du catalogue d'étoiles à l'instant t_0. Par contre dans cette configuration, le théodolite mis en position Az_{gi} et Dz_{gi} à l'instant t_0 ne visera pas parfaitement l'étoile : elle ne sera pas exactement au centre du champ de vision du théodolite.

Cette petite différence est la conséquence directe de la déviation de la verticale. Ainsi, chaque étoile sera à la position calculée uniquement si les coordonnées du lieu de station sont égales aux coordonnées GPS, c'est-à-dire lorsque la déviation de la verticale est nulle.

Calculs

Soit Dz_{gi} la distance zénithale géodésique apparente de l'étoile *i* calculée pour une position GPS donnée de mise en station. Dz_{gi} est la valeur qui sera envoyée au théodolite pour qu'il se mette dans cette direction. Par contre, nous pouvons d'ores et déjà affirmer que le théodolite ne visera pas parfaitement l'étoile excepté si les coordonnées GPS et les coordonnées astronomiques sont égales (ce qui équivaut à une déviation de la verticale nulle).

Soit Dz_a la distance zénithale mesurée par l'astrothéodolite en détectant l'étoile et en mesurant sa position dans l'image à une date précise à la microseconde. Après correction des angles à partir des valeurs d'étalonnage et après s'être ramené dans le bon référentiel en ayant pris en compte les décalages dues à la réfraction, il reste un tout petit décalage entre cette valeur obtenue et Dz_{gi} qui est dû à la déviation de la verticale.

Soit γ_i les corrections à apporter en particulier vis-à-vis de la réfraction, des mesures d'angles et des décalages temporels dus aux différents référentiels temporels.

On a donc un δDz_{zi} qui peut s'écrire de cette façon :

$$\delta Dz_i = Dz_{gi} = Dz_{ai} + \gamma_i.$$

Par ailleurs, en différenciant l'équation fondamentale suivante :

$$\cos Dz = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos AH \text{ avec } AH = HSG_0 + \frac{366{,}2422}{365{,}2422} t_{UT} + \lambda - \alpha.$$

avec :

- $Dz = Dz_{gi}$,
- α et δ, l'ascension et la déclinaison de l'astre.
- λ et ϕ, les coordonnées géographiques astronomiques.

On pose :

$$d\lambda = \lambda_{astro} - \lambda_{gps},$$

$$d\phi = \phi_{astro} - \phi_{gps}.$$

Nous obtenons, en simplifiant au premier ordre :

$$\delta Dz_i = -\cos Az_i \, d\varphi - \sin Az_i \cos\varphi \, d\lambda - \gamma_i.$$

Par ailleurs, nous avons les composantes de la déviation de la verticale :

$$\eta = \cos\varphi.(\lambda_a - \lambda_g)$$

$$\zeta = \varphi_a - \varphi_g.$$

Nous avons finalement :

$$\delta Dz_i = - \cos Az_i \ \zeta - \sin Az_i \ \eta$$

$$Dz_{gi} - Dz_{ai} = - \cos Az_i \ \zeta - \sin Az_i \ \eta - \gamma_i.$$

Ensuite, il suffit de résoudre par moindres carrés les n équations (n > 2) correspondant aux *n* observations afin d'obtenir les termes de la déviation de la verticale.

Description du matériel utilisé

Le système se compose de trois éléments principaux :

- un théodolite motorisé pour à la fois mesurer des angles précisément et avoir une bonne référence de verticale ;
- une caméra numérique avec son optique pour détecter les étoiles et mesurer leur position précisément ;
- un GPS pour dater les mesures et connaître la position géographique.

Ensuite, il faut bien entendu un ordinateur afin de commander les différents appareils, collecter les données et effectuer les calculs.

Le théodolite motorisé

Le théodolite utilisé est un TM3000 de Leica. C'est l'un des tout premiers théodolites motorisés de ce fabricant a avoir été commercialisé. Il présente de nombreux avantages.

- Il est robuste, c'est-à-dire que la masse de la caméra et la tension du câble qui relie la caméra au PC ne gênera pas les mouvements du théodolite.
- Sa précision de mesure atteint 0,5" soit 1,5 dmgr grâce à un codeur absolu dynamique. En général, le principe de fonctionnement est basé sur un système de capteurs optoélectroniques qui mesurent l'intensité lumineuse transmise à travers un cercle gradué avec une extrême précision (de l'ordre de 20 000 à 40 000 traits par tour). Paradoxalement, le système de Leica pour ce TM3000 ne comporte pas énormément de traits (360 traits par tour). En réalité, il est rendu très précis grâce à un mécanisme astucieux de mesure dynamique. Leica appelle ce genre de capteur : système dynamique et absolu par capteur angulaire opto-électronique à balayage diamétral. Le cercle gradué est entraîné en rotation pendant la mesure alors que deux paires de barrières infrarouges diamétralement opposées, l'une liée au bâti et l'autre fixée à la partie tournante, permettent la mesure du déphasage des signaux et donc l'obtention de la partie décimale de l'angle à mesurer. Une autre barrière infrarouge fournit la partie entière.
- Il est pilotable par un ordinateur par le biais d'une communication classique série RS232.
- Il possède un compensateur. Cette composante est primordiale car elle va nous permettre de connaître avec une très grande précision l'inclinaison du plateau du théodolite par rapport à l'horizontale. En effet, le bullage manuel qui consiste à manipuler les vis calantes du théodolite pour que la nivelle de rayon 40 mètres s'équilibre n'est évidemment pas suffisant dans notre cas. Le compensateur vient affiner la mesure d'horizontalité. C'est un compensateur à liquide qui permet de faire des mesures simultanément sur deux axes perpendiculaires. Son débattement est de 3,2' et possède une précision de l'ordre de 0,1 seconde d'arc. Ce compensateur est débrayable.

En revanche, il présente quelques caractéristiques assez gênantes. En particulier, le TM3000 n'est plus maintenu et il n'y en n'a pas plus d'une dizaine en France. Par ailleurs, son système de mesure reste assez lent (environ une seconde pour les mesures de faible définition, quelques secondes pour obtenir la meilleure précision). Enfin, ce type de monture est inadapté pour des visées au zénith car ses angles de débattements zénithaux sont essentiellement faits pour viser l'horizon. La caméra étant fixée sur la lunette, il a donc fallu intercaler un socle entre ces deux éléments.

La caméra et son optique

La caméra

La caméra utilisée est une PixelFly de PCO CCD Imaging. C'est une caméra qui possède un capteur CCD 2/3 pouce Noir & Blanc de résolution 1 280 x 1 024 avec des pixels carrés de 6,7 microns. L'image créée est codée sur 12 bits (soit 4 096 niveaux de gris). Elle est livrée avec une carte d'interfaçage à placer dans le PC. La liaison entre cette carte et la caméra est un simple câble Ethernet standard (les messages transmis n'ont aucun lien avec les protocoles standards Ethernet) qui permet de transférer le signal numérisé à l'intérieur du corps de la caméra.

Cette caméra possède deux modes de synchronisation : un en entrée et l'autre en sortie. L'entrée trigger déclenche la prise de vue sur le front montant. La sortie, quant à elle, est un signal à l'état haut qui passe à l'état bas durant la totalité de l'exposition puis revient à l'état haut. Ce dernier signal sera appelé CCDExp.

Ainsi, pour dater l'événement prise de vue, nous avons donc le choix :

- émettre un signal de la sortie PPS (Pulse Per Second) du GPS vers l'entrée trigger de la caméra ;
- connecter la sortie CCDExp sur l'entrée événement du GPS qui se charge ensuite d'attribuer une date au changement de signal. La détection se fera alors sur le front descendant pour dater le début de la prise de vue.

C'est le second type de synchronisation qui a été retenu : il est plus pratique que le premier car nous serions obligés d'attendre les PPS.

Par ailleurs, la caméra fournit la valeur du temps de pose à la microseconde près. Ce dernier paramètre est très important car durant une prise de vue de plusieurs millisecondes l'étoile se sera déplacé dans le champ de la caméra. Or, la détection de l'étoile sur l'image se faisant par calcul de son barycentre, la datation de la prise de vue doit correspondre au milieu du temps de pose. Le signal CCDExp ne servant qu'à dater le début de prise de vue, il est nécessaire de connaître le demi-temps de pose précisément.

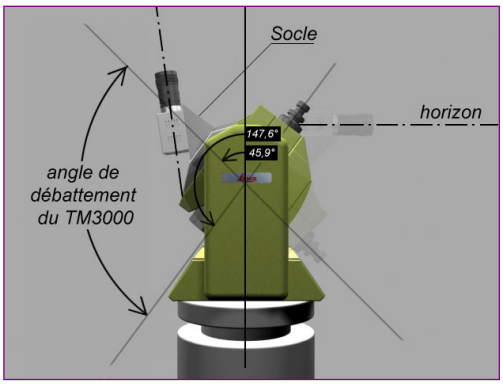


figure B.5.5 *: l'installation d'un socle permet de viser à la fois le zénith et l'horizon*

L'optique

La focale de l'optique de la caméra est déterminante pour la valeur angulaire de chaque pixel. Avec un objectif de focale 150 mm et des pixels carrés de 6,7 μm de côté, on obtient une valeur angulaire par pixel de 4,5e-5 radians soit inférieur à 10 secondes d'arc. En considérant que l'on obtient la position d'une étoile sur le capteur au dixième de pixel par calcul du barycentre, nous pouvons donc nous attendre à obtenir des résultats de détection à la seconde d'arc près. Nous utilisons actuellement un objectif de 100 mm avec un doubleur de 1,5 x, ce qui donne un objectif équivalent à 150 mm. Néanmoins, ce doubleur pose un gros problème de vignettage car le tirage optique par rapport à la caméra est trop court c'est-à-dire que la lentille de se doubleur est trop proche du capteur CCD pour obtenir une uniformité de luminosité sur l'ensemble des pixels.

Étant donné notre objectif de parvenir au dixième de seconde d'arc, il est évident qu'un tel objectif de 150 mm avec cet taille de pixel ne peuvent permettre d'atteindre ce résultat malgré le nombre d'étoiles mesurées. Il serait donc intéressant d'utiliser des objectifs de plus longues focales de l'ordre de 200 - 300 mm. Malheureusement, ce type d'objectif ne se trouve pas dans le commerce en monture C avec des masses et dimensions raisonnables pour notre système. Il reste la possibilité de fabriquer nous-même un montage optique suffisamment léger et peu encombrant. Une autre solution consisterait à ôter la lunette du théodolite pour la remplacer par une caméra munie de son optique, ce qui nous permettrait de s'affranchir de tous problèmes de masse et d'encombrement. Cette option a été envisagée, elle reste pour l'instant en suspend car nous ne possédons qu'un seul TM3000 en état de marche.

Le GPS

Le GPS System 530 de Leica possède deux entrées événement et une sortie PPS qui vont nous permettre de soit dater des événements extérieurs via l'un des ports événement, soit d'émettre des pulses datés vers l'extérieur. La première solution est bien souvent appelée pulse photogrammétrique car elle est souvent utilisé par les photogrammètres pour dater leurs prises de vue.

Dans ce dernier cas, le signal électrique entrant doit être de type TTL 3,3 à 5 V. Il sera détecté par le GPS en front montant ou descendant (configurable) et la durée du pulse doit être d'au moins 125 ns. Ce type de datation nous assure une précision meilleure que la micro-seconde.

Bilan d'erreur

Perturbations extérieures

Le vent et les vibrations

Le théodolite étant placé à l'extérieur, il peut subir la pression exercée par le vent sur sa surface et ainsi dégrader la précision des mesures. Pour notre objectif du dixième de seconde d'arc, cette influence extérieure est un problème. Il pourrait alors être nécessaire d'utiliser un paravent ou mieux une tente qui engloberait le théodolite et son pied avec une ouverture au zénith. De plus, il est impératif de placer le dispositif sur un pied lourd afin d'augmenter sa stabilité.

Les turbulences atmosphériques

Les turbulences atmosphériques peuvent créer des déviations de rayon par réfraction de l'ordre de 5 à 10 secondes d'arc d'une manière totalement aléatoire dans le temps. La fréquence de changement est de l'ordre de 10 Hz. Par ailleurs, le temps de pose, pour une étoile de forte luminosité (magnitude nulle), est de l'ordre de 0,1 seconde. Le temps de pose est alors de la même durée que la période de fluctuation atmosphérique.

Un processus qui va permettre de moyenner a donc été établi :

- soit l'étoile est peu brillante dans ce cas la prise de vue s'effectuera avec un temps de pose élevé et les turbulences atmosphériques seront donc naturellement moyennées ;
- soit l'étoile est très brillante, le temps de pose sera faible et nous allons devoir prendre plusieurs vues à la suite afin de moyenner en les sommant.

La réfraction

En astronomie de position, les observations se faisaient selon le principe des droites de hauteurs égales c'est-à-dire que toutes les observations étaient à une distance zénithale constante de 30° environ. Dans notre cas, nous nous sommes rendus compte qu'à certains moment, le nombre d'étoiles distinctes traversant le cercle des 30° était insuffisant du fait de la rapidité des mesures. Nous sommes donc obligé d'aller chercher des étoiles de hauteur différente durant les périodes d'insuffisance d'étoiles à 30°. Il sera alors nécessaire d'employer un modèle de réfraction classique pour ces étoiles.

Les imprécisions géométriques

La caméra a été fixée sur la lunette du théodolite sans aucun effort de précision et aucun réglage de positionnement n'a été prévu. Nous pouvons considérer qu'elle possède un repère fixe R_C par rapport à celui de la lunette R_L mais les paramètres de passage entre les deux repères sont inconnus et loin d'être négligeables. R_L est mobile par rapport au repère fixe R_B correspondant à la base du théodolite. Outre l'angle de rotation de la lunette par rapport à la base du théodolite, les inconnues de passage entre R_L et R_B sont essentiellement les erreurs de collimation et de tourillonnement.

Or, il nous est impossible d'effectuer un double retournement à cause de l'encombrement de la caméra implantée sur son socle, au dessus de la lunette. De ce fait, ce moyen très pratique pour déterminer facilement les erreurs de collimation et de tourillonnement n'est malheureusement pas envisageable dans notre cas. De surcroît, il ne faut pas oublier que l'optique de la caméra entraînera forcément de la distorsion perturbatrice pour une utilisation des coordonnées-image. Il a donc été nécessaire d'élaborer un processus d'étalonnage.

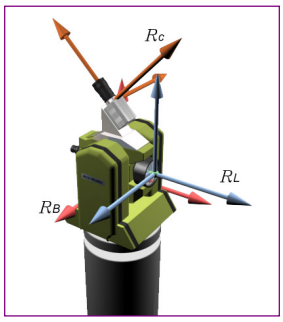


figure B.5.6 *: les différents repères de l'astrothéodolite*

L'étalonnage

Le système de coordonnées image

Dans notre cadre de visées à l'infini, il est légitime de ne pas prendre en compte le décentrement de la caméra par rapport à l'axe des tourillons. Nous pouvons donc considérer que la caméra est exactement à la croisée des axes des tourillons et de la verticale.

Le champ de vision de la caméra décrit un hémisphère axé sur le zénith : le système de coordonnées image doit donc être adapté. Ainsi, lorsque la caméra vise à l'horizon, nous avons quasiment un système orthonormé. Par contre, dés qu'elle vise plus haut, c'est exactement comme si nous nous mettions au centre de la terre et que nous visualisions les méridiens et les parallèles, c'est-à-dire que les méridiens semblent converger vers un point et que les parallèles paraissent courbes. Au zénith, le système de coordonnées est centré en un point : c'est l'équivalent des coordonnées d'une stéréographie polaire.

Nous avons donc intégré cette fonction de correspondance entre les points images et les angles du théodolite.

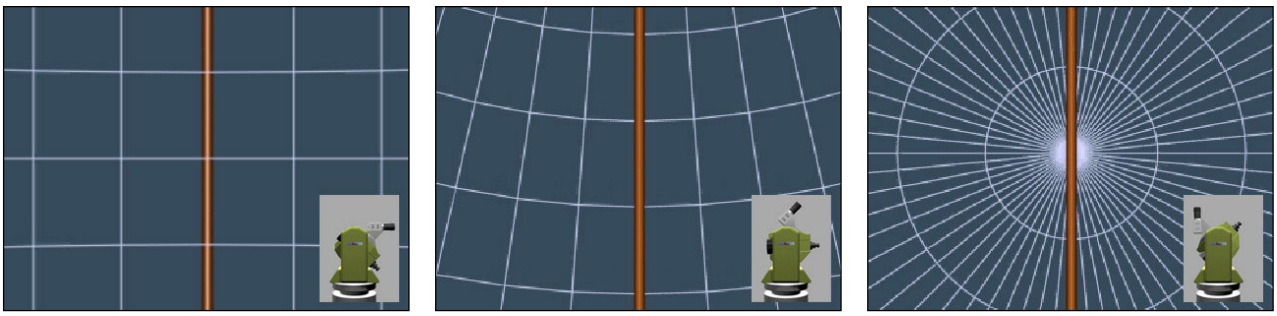


figure B.5.7 *: évolution des coordonnées image en fonction de l'angle zénithal du théodolite : 90°, 45° et 0°*

Principe de l'étalonnage

Les contraintes

La caméra pouvant recevoir des chocs pendant les déplacements ou la mise en place du système, il est nécessaire de pouvoir étalonner le dispositif sur le terrain. Cet étalonnage doit évidemment concorder avec le contexte : nous ne pouvons pas espérer posséder un polygone d'étalonnage lors de la mise en station. Par contre, nous pouvons espérer avoir à disposition un point lumineux fixe à l'horizon et à l'infini ou à défaut, d'installer nous-même un spot.

Cet étalonnage doit être suffisamment rapide : de l'ordre de cinq minutes. Par contre, la précision escomptée, dans un premier temps, n'est pas véritablement une contrainte : notre seul but est d'obtenir un système suffisamment précis pour pouvoir trouver l'étoile recherchée dans la partie centrale du champ de la caméra. Ce n'est qu'après les mesures que nous serons à même d'affiner le degré de précision grâce, notamment, aux étoiles hors du cercle des 30°.

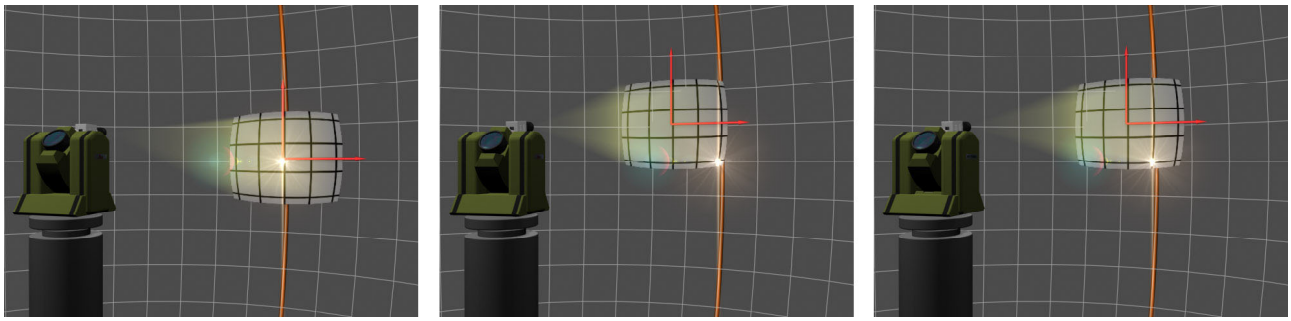


figure B.5.8 *: principe de fonctionnement de l'étalonnage*

Le principe

Il s'agit d'utiliser la fixité d'un point situé à l'infini afin de créer une grille de points tout en explorant la totalité du champ de la caméra. Pour cela, nous allons utiliser les mouvements du théodolite. Au tout début de l'étalonnage, nous commençons par entrer les paramètres de la grille : le nombre de points *n* x *m* en hauteur et largeur. Ensuite, connaissant la focale approximative de l'objectif, il est possible d'extrapoler le pas angulaire approximatif entre chaque point pour que le point lumineux se déplace de façon à parcourir tout le champ de vue de la caméra. Ensuite, à chaque position, nous détectons la position dans l'image du point lumineux par corrélation. De ce fait, plusieurs paramètres sont étalonnés : la distorsion optique et l'inclinaison de la caméra par rapport à l'axe des tourillons (en quelque sorte : le tourillonnement). Par contre, la collimation demeure inconnue mais n'a aucune conséquence puisque l'étalonnage s'effectue à l'horizon.

Enfin, nous utilisons un modèle polynomial intégrant donc à la fois les erreurs de géométrie optique et une partie de la géométrie du placement de la caméra par rapport à la lunette. La résolution s'effectue par moindres carrés du système à neuf inconnues à partir des mesures sur les *n* x *m* points de la grille.

Correction des erreurs de collimation et de tourillonnement

Bien que l'inclinaison de la caméra par rapport à l'axe des tourillons soit pris en compte dans l'étalonnage pour la position de visée vers l'horizon, l'évolution de l'erreur provenant de cette inclinaison au cours de la montée vers le zénith devient très importante. Cette erreur influe surtout sur les mesures azimutales.

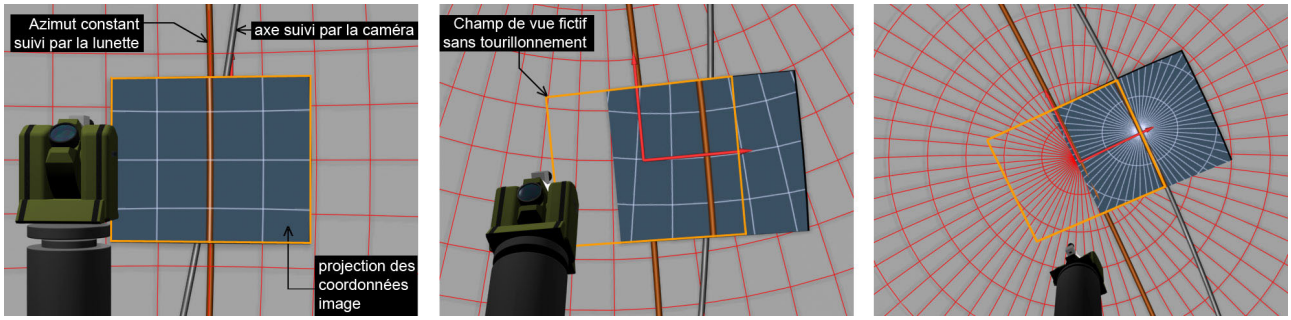


figure B.5.9 *: en visée à l'horizon, les coordonnées image rectifiées par l'étalonnage correspondent bien*

Par contre, dès que le théodolite monte en zénithal à azimut constant, la caméra croit suivre l'axe « azimut constant » mais suit en réalité l'axe gris incliné de l'angle de tourillonnement par rapport à l'axe « azimut constant » et il en va de même pour la collimation qui influe elle aussi sur les mesures azimutales. Par contre, elle reste inchangée lors de la montée vers le zénith. Elle correspond en réalité à l'orientation de l'axe de visée de la caméra par rapport à l'axe de visée du théodolite selon le plan formé par l'axe des tourillons et l'axe de visée du théodolite.

Ces deux types d'erreur seront corrigés après chaque série de mesures à partir des étoiles hors du cercle des 30° en les choisissant bien avec des distances zénithales variées. En effet, plus les distances zénithales sont variées, plus la détermination de l'erreur de tourillonnement sera précise. Cette correction n'a pas encore été prise en compte dans le logiciel *Astrothéo*.

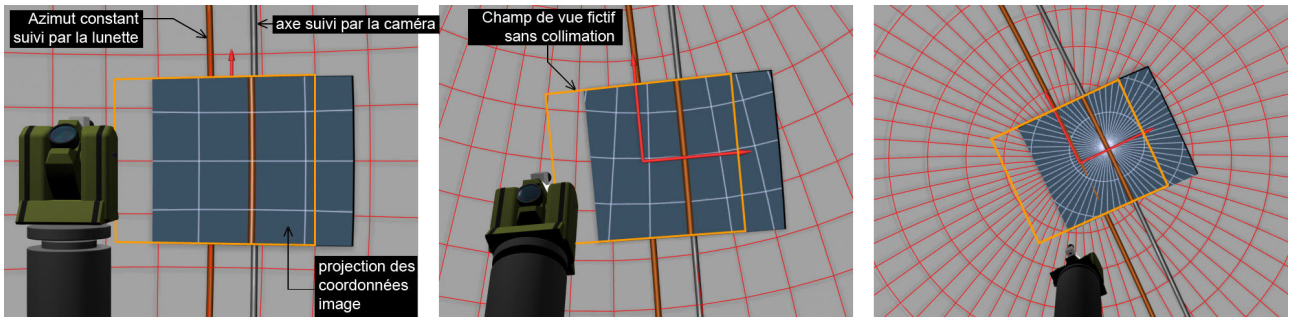


figure B.5.10 *: effet de la collimation sur l'image obtenue*

Le logiciel *Astrothéo*

Afin de coordonner, rassembler les données, calculer les différents paramètres, nous avons conçu un logiciel nommé *Astrothéo*. Ce dernier permet à la fois de commander le théodolite, le GPS et la caméra mais aussi de calculer la position des étoiles par rapport à un point de station et une heure donnée. Il a été implémenté sous Windows. Ce logiciel est articulé autour de différents modules. Nous allons à présent en détailler quelques-uns.

Les différents tableaux de commandes

La caméra

Cette partie permet de commander des prises de vue en choisissant le temps de pose grâce à un curseur de réglage qui s'échelonne de 10 µs à 10 s. Il est aussi possible de lancer les prises de vue en mode vidéo jusqu'à 12 img/s. Cette fenêtre a pour rôle essentiellement de permettre la visualisation lors des manœuvres manuelles. Par exemple, lorsque nous voulons viser le point lumineux disposé à l'horizon pour l'étalonnage, le mode vidéo est intéressant car nous n'avons aucun viseur permettant de le faire.

Le TM3000

Cette fenêtre permet à la fois de lire la position du TM3000 et d'envoyer des ordres : commande angulaire, changement de vitesse ou d'accélération. Il est possible aussi d'activer ou de désactiver le compensateur et le calculateur interne du TM3000.

Le GPS

C'est à partir de cette interface qu'il est possible de se connecter au GPS et de lire les mesures de lieu et de temps fournies par le GPS.

L'astronomie

Cette fenêtre affiche la liste des étoiles classées par magnitude, visibles dans le ciel à un instant donné. Le lancement de l'orientation du système ainsi que celui des mesures s'effectue à partir de cette interface.

L'étalonnage

La partie étalonnage est paramétrable dans cette fenêtre. Nous entrons le nombre de points en hauteur et largeur qui formeront la grille. Ensuite, lorsque l'image de la caméra possède le point lumineux en son centre, nous pouvons lancer le processus d'étalonnage. Deux fenêtres apparaissent alors : l'une montrant l'image du point lumineux, modèle pour la corrélation et la seconde montrant l'image du point lumineux pour un positionnement correspondant à un point de la grille.

Par ailleurs, trois icônes de la fenêtre principale permettent de modifier la fonction du curseur. Le curseur par défaut dans la fenêtre de visualisation permet de jouer le rôle classique de déplacement de l'image lorsque cette dernière est plus grande que le cadre de la fenêtre.

Il est ensuite possible de choisir le curseur de visée. Dans ce cas, en cliquant à un endroit de l'image, le théodolite se positionnera de telle sorte que la caméra soit centrée exactement sur le point désigné (à condition que le système soit correctement étalonné). Enfin, la dernière icône permet d'enclencher le positionnement manuel. En effet, étant donné que le TM3000 ne possède pas de positionnement manuel par molette, il a été nécessaire de réaliser une commande par le clavier pour le diriger manuellement. C'est à ce moment que le mode vidéo de la caméra devient intéressant.

La détection automatique d'étoiles

Pour connaître la position précise et atteindre une définition subpixellaire (au environ du dixième de pixel), il est nécessaire de détecter le barycentre de l'étoile automatiquement. L'objectif de la caméra est réglé de telle sorte que l'image d'une étoile sera légèrement floue. En effet, plus la tache lumineuse provenant de l'étoile sera étendue, plus le calcul barycentrique sera précis dans la limite d'une luminosité convenable.

Avant tout, il est indispensable de traiter les points chauds, c'est-à-dire les pixels dont la génération de charges thermiques est plus grande que la moyenne des autres points. Ils apparaissent alors comme des étoiles d'un pixel très lumineux lors des temps de pose élevés. Un point chaud est heureusement fixe et il suffit de calculer la moyenne radiométrique de ses voisins afin de remplacer sa valeur. Ensuite, la détection d'étoile ne sera plus perturbée par ces pixels lumineux.

La première phase de la détection automatique consiste à sous échantillonner l'image afin de trouver rapidement et grossièrement l'emplacement de la tache lumineuse sur l'image en utilisant les projections horizontales et verticales des valeurs des pixels. Ces projections possèdent en effet des maximums qui correspondent aux coordonnées image de l'étoile. Une fois l'étoile grossièrement détectée, il suffit d'extrait la portion d'image qui nous intéresse autour de la tache lumineuse et de calculer précisément son barycentre. Le résultat obtenu est de l'ordre du dixième de pixel.

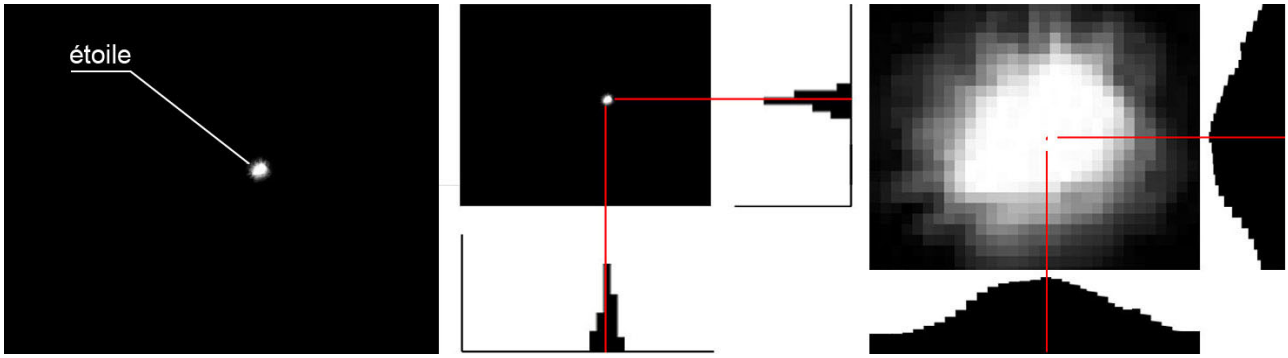


figure B.5.11 *: à gauche : l'image prise par la caméra.*
Au milieu : l'image sous-échantillonnée avec les projections horizontales et verticales.
À droite, la portion extraite de l'image pleine résolution avec le résultat du calcul barycentrique.

Le temps de pose automatique

Toujours dans un souci d'automatisation et de rapidité des mesures, il a été indispensable d'opter pour un temps de pose automatique suivant la valeur de la magnitude des étoiles visées. Après expérience, il s'est avéré que pour des étoiles de magnitude nulle ou négative, un temps de pose de 100 ms était suffisant.

La magnitude apparente est définit par la formule suivante :

$$M = -2{,}5.LOG(E) + k$$

où :

- M est la magnitude apparente ;
- E, l'éclairement en lux de l'étoile ;
- k, une constante.

Comme nous connaissons la durée de temps de pose nécessaire pour une étoile de magnitude $M_0 = 0$, nous allons prendre ce type d'étoile pour référence afin d'en déduire le temps de pose nécessaire pour une étoile de magnitude M_1.

$$M_1 = -2{,}5.LOG(E1) + k \text{ d'où } E_1 = 10^{\frac{-M1}{2{,}5}} . 10^{\frac{k}{2{,}5}} \qquad (1)$$

$$M_0 = -2.5.LOG(E0) + k \text{ d'où } E_0 = 10^{\frac{-M0}{2{,}5}} . 10^{\frac{k}{2{,}5}} \qquad (2)$$

Finalement, en divisant (1) par (2), nous obtenons :

$$E_1 = E_0 . 10^{\frac{(M0 - M1)}{2{,}5}} .$$

Or, étant donné que nous avons besoin d'un temps de pose inversement proportionnel à l'éclairement reçu, le temps de pose nécessaire pour une étoile donnée de magnitude apparente *m* est :

$$P_m = P_o . 10^{\frac{m}{2{,}5}} .$$

Orientation du système

Il est indispensable d'orienter correctement la station en début d'observation. Or, étant donné que sur le terrain, des points connus à l'horizon ne seront pas toujours disponibles, il a fallu trouver le moyen de s'orienter indépendamment de tout repère géodésique.

Une solution serait d'utiliser une boussole électronique dont le capteur serait fixé sur le théodolite. Ainsi, son orientation par rapport au nord serait asservi par ce capteur. Cette solution est malheureusement impossible étant donné que le TM3000 et la caméra sont tous deux en métal et constituent de ce fait des éléments perturbateurs.

La solution qui a été adoptée consiste à calculer la position d'une étoile dont le mouvement apparent dans le ciel est quasi nul : par exemple, l'étoile polaire pour l'hémisphère nord. Dans un premier, nous devons orienter l'axe de visée de la caméra à la distance zénithale correspondant à celle de l'étoile.

Ensuite, il suffit de jouer manuellement sur l'azimut afin d'observer sur l'image de la caméra préalablement mise en mode vidéo, le point lumineux de l'étoile. Enfin, le détecteur d'étoile asservit le théodolite en position afin que l'étoile soit au centre de la prise de vue. Le système est alors orienté : l'azimut du théodolite prend alors la valeur de l'azimut de l'étoile.

L'astronomie et le planétarium

Un catalogue d'étoile est une liste d'étoile qui énumère pour chacune d'elle la déclinaison et l'ascension droite à une date *t* bien précise. Il existe plusieurs repères temporels. Le dernier est le système J2000,0 qui correspond au 1er janvier 2000 à 0 h 00 min 00,0 s. En connaissant de plus la parallaxe, les mouvements propres et la vitesse de chaque étoile ainsi que les différents paramètres du mouvement de la terre, il est alors possible de déterminer avec une très grande précision les coordonnées angulaires (distance zénithale et azimut) de ces étoiles pour un lieu et une date donnés.

Dans un premier temps, nous avons utilisé le catalogue FK5 (Fifth Fundamental Catalog) partie I et II qui contient 4 652 étoiles. Ce catalogue possède la particularité d'avoir une bonne répartition d'étoiles. Le système est J2000,0 et la précision est de l'ordre de 0,1 à 0,15 seconde d'arc à la date du premier janvier 2000. Par la suite, nous avons opté pour le catalogue Sky2000 afin d'obtenir les noms des étoiles. Cet ajout peut apparaître superflu mais nous nous sommes rendu compte cela permet une plus grande aisance lors des choix d'étoiles.

Le problème majeur de ce dernier changement est la vraisemblable incompatibilité de Sky2000 avec les algorithmes de calcul. Nous obtenons en effet une incohérence de résultat de l'ordre de 3-4 10^{-5} grades dans les positions des étoiles, ce qui donne une imprécision d'environ 0,13 seconde d'arc. Dans le futur, ces deux catalogues seront à remplacer par le catalogue Hipparcos qui lui, est homologué par les concepteurs des algorithmes de calcul provenant de l'USNO (United States Naval Observatory). Et ce sont ces algorithmes que nous utilisons. Il s'agit plus particulièrement d'un programme en C nommé NOVAS (Naval Observatory Vector Astrometry Subroutines) qui permet de calculer pour une position et une date données, les coordonnées (distance zénithale et azimut) de chaque étoile à partir du catalogue. La précision des calculs est meilleure que 0,001 seconde d'arc selon les concepteurs.

Par ailleurs, nous avons aussi créé un planétarium interactif qui permet de mieux choisir les étoiles que nous désirons viser durant la soirée. Ce planétarium a été conçu en openGL afin de pouvoir choisir son point de vue et de l'animer afin d'observer son évolution dans le temps. Il est alors possible de tracer un chemin dans le ciel entre les différentes étoiles qui nous intéressent.

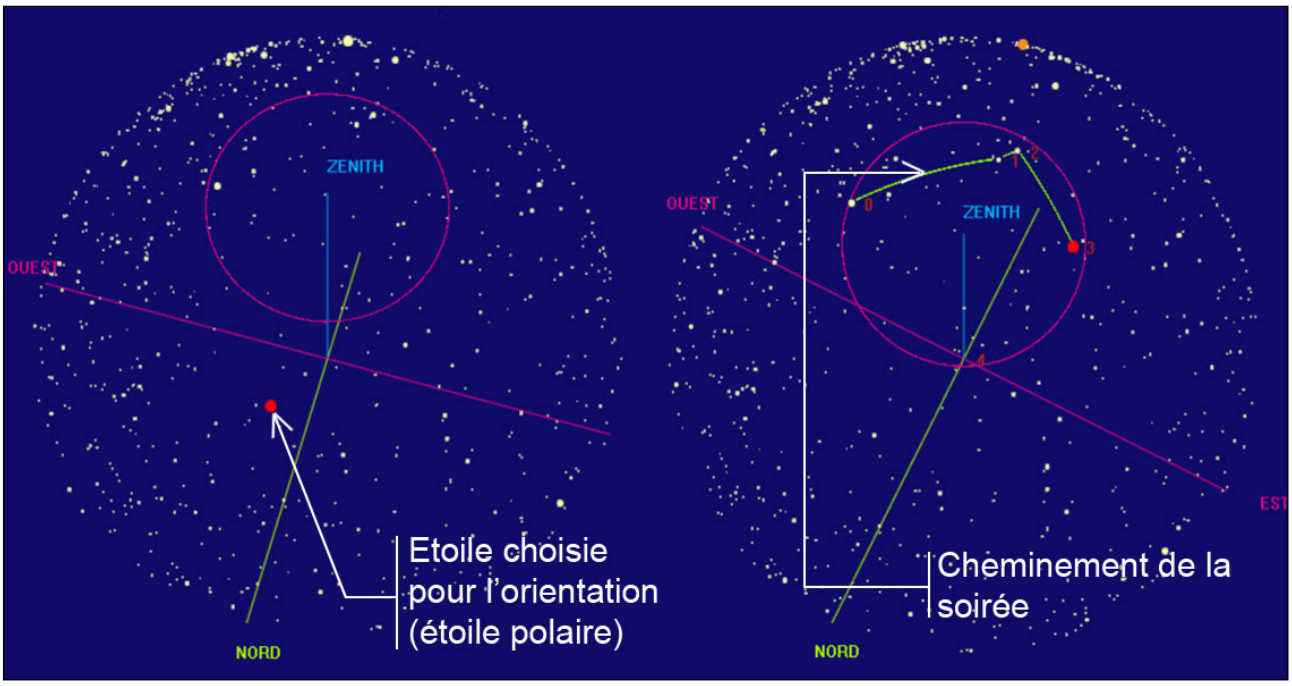


figure B.5.12 *: planétarium interactif : la dimension des points dépend de la magnitude.*
Il est possible de tracer un cheminement pour la soirée et d'observer le ciel animé.

Conclusion

Nous avons effectué à ce jour plusieurs soirées d'observation qui nous ont permis chacune de mesurer des séries d'une vingtaine d'étoiles. Il reste encore quelques réglages au niveau de l'interfaçage des différents appareils mais nous avons finalement un logiciel qui fonctionne et qui permet d'avoir une grande liberté dans le choix des étoiles notamment.

Pour l'instant, la partie calcul des résultats n'est pas encore terminée. Elle permettra à l'utilisateur de se rendre compte de la qualité des mesures et de prendre la décision d'interrompre ou de continuer la soirée. Il faudra ensuite prévoir un processus de post-traitement afin d'affiner ces estimations. Par ailleurs, la partie étalonnage n'est pas encore satisfaisante et nous espérons encore pouvoir modifier le théodolite afin que sa lunette soit remplacée par la caméra et son optique et de ce fait, que le double retournement soit rendu possible. Cette dernière option simplifierait évidemment grandement cette partie étalonnage. Enfin, la caméra actuelle ne permet pas de connexion directe sur un ordinateur portable étant donné sa carte à insérer dans le PC. Nous désirons donc très prochainement acquérir une caméra à interface IEEE1394 (firewire) afin de remplacer l'ordinateur fixe de bureau par un portable. Ce projet se terminera vraisemblablement vers la fin de l'année 2004.

Publications

[BOTTON 02] S. Botton : *Introduction à la géodésie*, cours, IGN, CPRG-ENSG, Marne-la-Vallée, 2002.

[DUFOUR 99] J.-Ph. Dufour : *Cours d'introduction à la géodésie*, IGN, CPRG-ENSG, Marne-la-Vallée, septembre 1999.

[DUQUENNE 98] H. Duquenne : *QGF98, a new solution for the quasigeoid in France,* École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans (F), http://www.esgt.cnam.fr, 1998.

B.6 Étude de la cohérence inter-représentations : vers une meilleure intégration des bases de données spatiales

David Sheeren

Introduction

Ces travaux se situent dans le cadre de l'intégration de bases de données spatiales. Depuis quelques années, la disponibilité croissante de l'Information Géographique a induit de nouveaux besoins pour les organismes producteurs et utilisateurs de données géographiques. Afin d'assurer une maintenance plus efficace des produits, de garantir une cohérence entre eux, et d'exploiter toute la richesse de l'information disponible sur une même portion de territoire, la définition de liens explicites entre plusieurs sources de données est aujourd'hui souhaitée. Ces liens constituent le pré-requis de l'unification ou intégration.

Pour les bases de données (BD) dites classiques, c'est-à-dire non géographiques, de nombreuses recherches concernant l'intégration ont déjà été menées [PARENT 01]. Certaines contributions se sont focalisées sur le problème de l'appariement des schémas, préalable à la création du schéma unifié. Cette étape révèle de nombreux conflits entre les éléments des schémas initiaux, tant sur le plan structurel que sur le plan sémantique. D'autres contributions se sont attachées à étudier la mise en correspondance des données, qui aboutit à la matérialisation des relations entre instances. L'intégration à ce niveau peut se faire de manière virtuelle, les données ne sont pas physiquement réunies, ou de manière réelle, les données sont centralisées dans un système unique.

Dans le contexte des bases de données spatiales, l'intégration nécessite une adaptation des méthodologies existantes et l'utilisation d'outils d'appariement spécifiques pour mettre en correspondance les objets [DEVOGELE 97]. Parmi le panorama des problèmes que soulève l'intégration de ces BD, se pose celui du maintien de la cohérence entre les représentations d'un même phénomène géographique : [EGENHOFER et al 94] et [EL-GERESY, ABDELMOTY 98]. Dans la plupart des travaux actuels, l'unification des données se limite à leur appariement. Aucun examen n'est entrepris pour vérifier si les différences de représentation sont normales, c'est-à-dire, si elles découlent des différents critères de saisie et de contenu des bases. Pourtant, cette étude est nécessaire si on veut éviter d'introduire des erreurs de saisie dans le système unifié et garantir des réponses cohérentes à l'utilisateur qui exploiterait un système à représentations multiples. L'unification des données suppose donc de comprendre aussi la nature des différences de représentation entre les objets de chaque base et d'étudier comment ces objets se correspondent (figure B.6.1, ci-dessous). En particulier, si un même phénomène est représenté différemment dans deux bases, il faut être capable de savoir si cette différence s'explique soit par des différences de spécifications entre les bases, que nous appelons des « *équivalences* » entre représentations, soit par des différences d'actualité des données, ou encore, par des erreurs de saisie dans l'une ou l'autre des bases, que nous appelons des « *incohérences* » entre représentations.

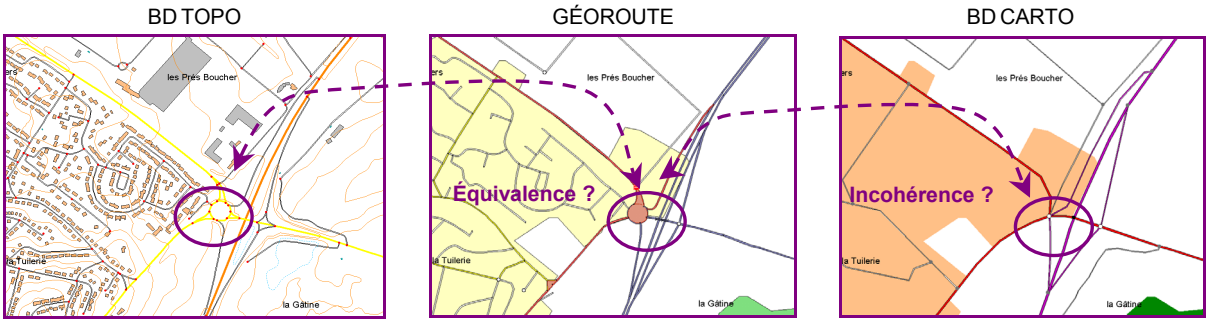


figure B.6.1

Unifier les données, c'est expliciter les liens entre ces données et comprendre les différences de représentation.

L'objectif de cet article est d'exposer l'état d'avancement de nos travaux de recherche consacrés à cette problématique. Nous présentons d'abord notre approche pour garantir la cohérence inter-représentations et guider l'intégration des données. Nous décrivons ensuite quelques résultats obtenus. Ces travaux s'inscrivent dans l'action de recherche « *Temps et Niveaux de détail* » du laboratoire COGIT. D'autres aspects de l'intégration des BD Géographiques étudiés dans cette action sont abordés dans [MUSTIÈRE et al 03].

Approche

L'approche que nous proposons pour évaluer la cohérence nécessite d'utiliser des connaissances et des outils particuliers. La première partie de cette section est consacrée à leur description. Elle suppose aussi de suivre une démarche bien définie. Elle fait l'objet de la seconde partie.

Outils et connaissances pour l'évaluation de la cohérence

Connaissances implicites et explicites : les spécifications

Pour étudier la conformité des représentations, nous avons choisi d'utiliser les spécifications. Ces documents, qui décrivent quels objets sont saisis dans la base et comment ils sont modélisés, constituent la référence pour juger si les représentations sont normales ou non, et *a fortiori*, si les différences de représentations sont incohérentes ou équivalentes.

Bien que l'utilisation des spécifications semble assez naturelle, elle ne va pas sans poser un certain nombre de difficultés. L'ensemble des contraintes décrites en langage naturel manque souvent d'exhaustivité et nécessite fréquemment une interprétation. Par exemple, on trouve des descriptions du type : *« les cours d'eau temporaires artificiels ou artificialisés sont saisis en fonction de leur importance et de leur environnement »*, ou encore, *« les petits bâtiments d'aspect précaire sont exclus »*. Ces descriptions suffisent aux opérateurs de saisie qui utilisent leurs connaissances et leur savoir-faire pour déterminer les objets à sélectionner. Cependant, dans notre contexte d'intégration et d'automatisation, ces descriptions ne sont pas toujours suffisamment adaptées. Ces règles ne sont pas assez formalisées. D'autre part, les spécifications présentes dans les documents ne contiennent pas toute l'information nécessaire : il existe généralement des spécifications implicites qu'il est nécessaire d'extraire des données pour mener à bien l'évaluation des différences.

L'apprentissage artificiel pour extraire les connaissances implicites

Nous avons décidé d'utiliser des techniques d'intelligence artificielle pour acquérir les connaissances implicites : l'apprentissage automatique supervisé [MITCHELL 97], [SESTER 00] et [MUSTIÈRE 01].

Le problème d'apprentissage supervisé peut être défini de la manière suivante : étant donnée un ensemble d'*exemples* (x_i, y_i), trouver une fonction de classification ou de prédiction telle que $f(x_i)$ soit comme y_i. Les x_i correspondent aux *observables.* Les y_i correspondent aux étiquettes ou *classes* des observables. La fonction *f* correspond au *classifieur* à apprendre (figure B.6.2).

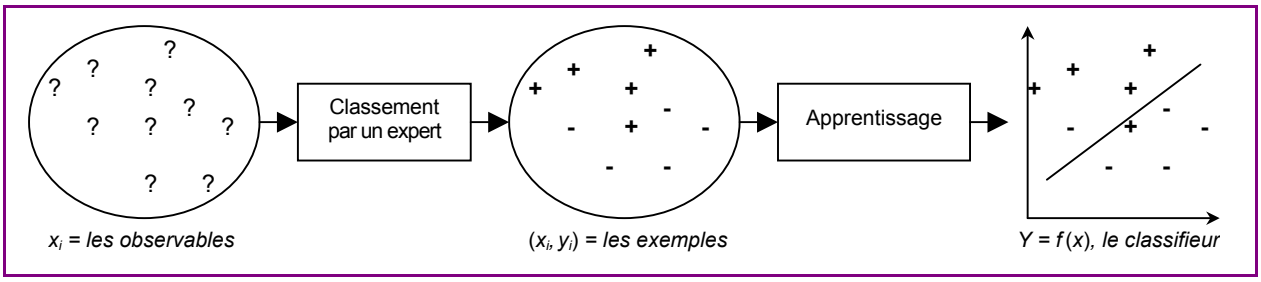


figure B.6.2

Mise en œuvre d'un processus d'apprentissage artificiel supervisé :
classification interactive des observables, obtention des règles de classification par les algorithmes d'apprentissage.

Dans notre cas, l'apprentissage est donc envisagé pour extraire des critères de saisie implicites existant dans les données. Comme nous le verrons par la suite, l'apprentissage peut également servir à produire des règles pour classer directement les différences de représentation en terme d'incohérence ou d'équivalence [SHEEREN 04a].

Un système-expert pour manipuler automatiquement les connaissances

L'ensemble des connaissances issues des spécifications implicites et explicites est stocké dans un système-expert [DAVID et al 93]. Ce type de système est particulièrement bien adapté à l'automatisation de notre processus car il permet de gérer un grand nombre de règles de manière efficace. On peut ajouter, modifier ou éliminer des règles, sans pour autant transformer les programmes qui les activent. Contrairement à une approche procédurale, les connaissances sont ici séparées du moteur qui les manipule. Ceci leur confère une grande flexibilité et cette caractéristique est très utile dans notre cas.

L'analyse spatiale pour extraire les informations implicites

Les connaissances présentes dans les spécifications font référence à des concepts géographiques qui ne sont pas toujours explicitement représentés dans les BD. En plus de formaliser les spécifications, il est également nécessaire d'extraire des informations souvent accessibles directement par une simple analyse visuelle des données, mais plus difficile à obtenir automatiquement. C'est par exemple le cas des ronds-points dans certaines BD de l'IGN. Le concept de rond-point est bien identifiable en regardant les données, mais dans la base, il correspond seulement à un ensemble d'arcs et de nœuds connexes. Les propriétés géométriques des objets et les relations spatiales entre ceux-ci sont également implicites.

Une route sinueuse, des bâtiments alignés, une allée menant à un lac, sont autant de concepts qui sont observables dans les données mais qui ne sont pas directement stockés. Dans certains cas pourtant, ces informations doivent être extraites, car le contrôle de la présence ou de la représentation des objets en utilisant les spécifications le nécessite. Celles-ci sont obtenues à l'aide d'outils d'analyse spatiale et de mesures diverses (indice de forme, dispersion, agrégation, voisinage…).

Processus d'évaluation de la cohérence

Après avoir décrit les outils et les connaissances dont nous avons besoin pour traiter notre problématique, nous exposons ci-dessous la démarche à suivre pour les mettre en œuvre.

Les étapes du processus et leur enchaînement

Nous avons identifié différentes étapes pour évaluer la cohérence entre les représentations de plusieurs bases de données. Nous les décrivons brièvement ci-dessous.

La première étape consiste à étudier le contenu de chaque BD, avant leur mise en correspondance. C'est l'étape d'*analyse des spécifications.* Celle-ci aboutit au peuplement de bases de règles qui serviront aux autres étapes du processus. La deuxième étape est une phase d'*enrichissement.* Elle est mise en œuvre pour extraire des BD les objets implicites utiles au contrôle. Ensuite, une première vérification de la représentation des données est réalisée en utilisant les spécifications sous forme de règles : c'est l'objet du *contrôle intra-base*. À ce stade, les bases sont toujours indépendantes. Suit alors l'étape d'*appariement*. Les correspondances entre les éléments sont calculées. À son terme, les couples sont qualifiés et seuls les liens jugés certains sont retenus pour la suite du processus, les autres couples sont classés comme incertains. Le processus se poursuit avec le *contrôle inter-base*. Cette dernière étape s'attache à étudier le respect des spécifications de chaque élément du couple en utilisant la représentation des deux bases de données. À son terme, chaque couple est interprété en terme d'incohérence ou d'équivalence et une description de l'origine des différences est fournie.

Ces étapes composent donc le processus dont le déroulement varie en fonction de l'existence ou non des spécifications explicites. Trois cas peuvent se produire :

- on ne dispose d'aucune spécification des bases à intégrer ;
- on dispose des spécifications des bases mais celles-ci sont incomplètes ou on souhaite les affiner ;
- on dispose des spécifications des bases et celles-ci sont précises et exhaustives.

Le processus en présence de spécifications exhaustives

On suppose ici que les spécifications dont on dispose sont suffisamment précises et complètes pour constituer l'ensemble de la connaissance nécessaire à l'interprétation. Dans ce contexte, toutes les bases de règles sont développées à partir de l'examen des spécifications et aucun apprentissage n'est envisagé. Le processus de la figure B.6.3 illustre la démarche à suivre.

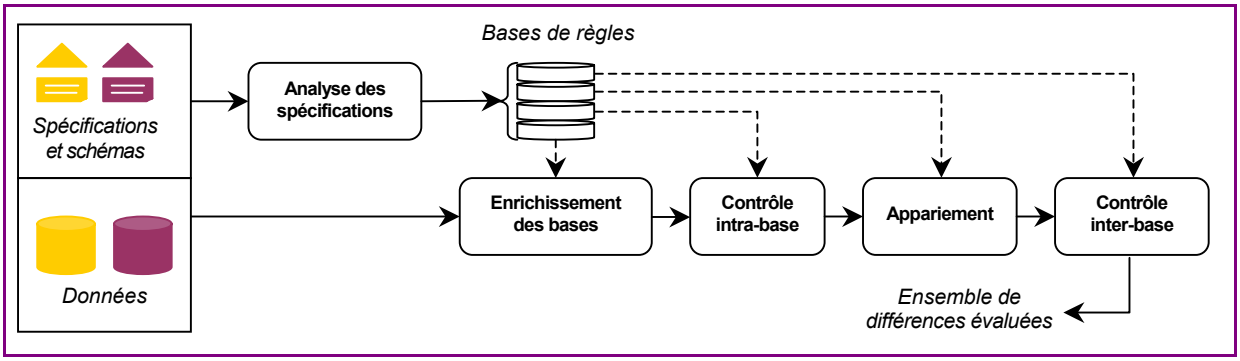


figure B.6.3

Processus d'évaluation des différences en présence de spécifications exhaustives.

Le processus en présence de spécifications incomplètes, ou le raffinement des spécifications

On considère ici que l'information présente dans les spécifications ne suffit pas à expliquer l'ensemble des différences, en raison d'ambiguïtés et d'incomplétudes dans les documents. Le processus s'applique aussi lorsqu'on souhaite affiner les spécifications et obtenir des spécifications plus justes, qui reflètent mieux la réalité des bases. Il existe en effet 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 mètres). On souhaite tenir compte de cet écart pour interpréter les différences de représentation de manière plus fine.

La démarche à suivre est illustrée à la figure B.6.4, ci-dessous. Elle présente des différences par rapport à la démarche précédente. Celles-ci s'expliquent par le fait que les connaissances manipulées sont extraites pour la plupart des données et non des spécifications. Les bases de règles sont constituées au fur et à mesure du processus et proviennent à la fois de l'examen des spécifications, et de l'analyse des correspondances. On utilise donc ici les outils d'apprentissage artificiel.

L'apprentissage peut être mis en œuvre à plusieurs niveaux. D'abord, lors du contrôle intra-base. On peut apprendre les règles de représentation des objets à partir des données. Par exemple, pour les ronds-points, on peut apprendre le seuil qui définit le passage d'une représentation ponctuelle à une représentation détaillée. Ensuite, l'apprentissage peut être utilisé lors du contrôle inter-base. Nous détaillerons sa mise en œuvre pour cette étape dans le chapitre suivant.

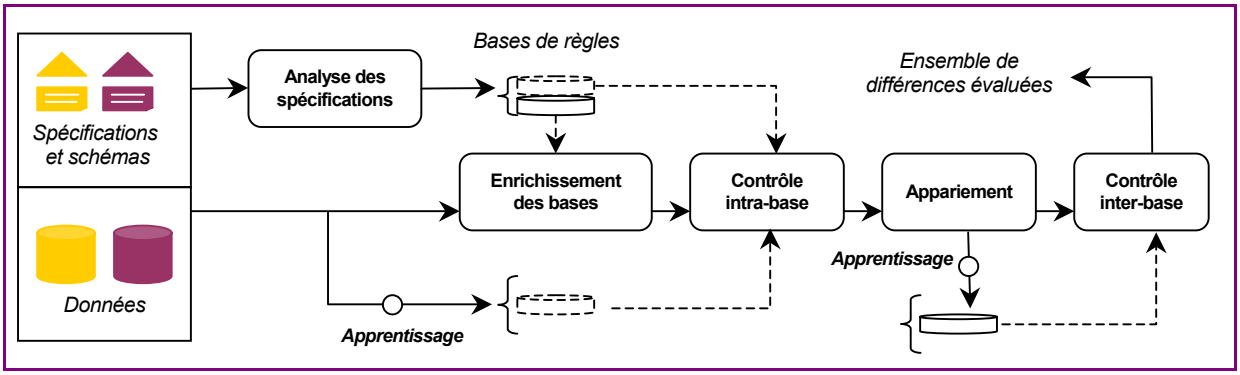


figure B.6.4

Processus d'évaluation des différences
en présence de spécifications incomplètes ou raffinement des spécifications.

Le processus en l'absence de spécifications

Si les spécifications n'existent pas explicitement dans des documents ou que ceux-ci ne sont pas disponibles, il est plus difficile de contrôler les représentations. Une démarche similaire à la précédente, en utilisant l'apprentissage artificiel pour apprendre des règles de classification des différences, peut être mise en œuvre. Cependant, il est plus difficile de contrôler la cohérence des règles apprises. Il faut s'assurer que les règles extraites des données reflètent réellement les spécifications. Ceci est possible lorsque leur existence n'est que partielle ou qu'on souhaite les affiner (contexte précédent). C'est plus délicat lorsque aucune information n'est disponible. On peut seulement utiliser des connaissances géographiques générales ou supposer l'existence d'un ordre entre les représentations pour des bases de résolutions différentes. En l'absence de spécifications, le processus précédent peut-être mis en œuvre (figure B.6.4), mais les règles apprises seront difficilement contrôlables.

Acquérir les connaissances pour le contrôle inter-base : deux approches différentes

Comme nous l'avons précisé précédemment, l'étape du *contrôle inter-base* dans le processus consiste à étudier si les objets de chaque BD respectent leurs spécifications, en utilisant les représentations des deux BD. Deux approches sont possibles pour mettre en œuvre ce contrôle. Nous les détaillons ci-dessous.

Première approche : classification directe

Pour cette approche, on constitue une base de règles qui permet de classer directement chaque couple d'objets appariés en terme d'incohérence ou d'équivalence en fonction de la représentation des objets constituant le lien. Ainsi, par exemple, si pour un couple de ronds-points appariés, celui de la BD1 est modélisé par un nœud, et celui de la BD2, moins détaillée, est modélisé par un ensemble d'arcs et de nœuds, on classera le couple comme incohérent (en fonction bien sûr des spécifications).

Autrement dit, la classification directe des différences consiste à activer un ensemble de règles décrites sous la forme :

Si objet$_{BD1}$ = représentation$_i$ et objet$_{BD2}$ = représentation$_j$
ALORS les représentation sont *incohérentes/équivalentes*

Les règles activées par le système-expert peuvent être introduites à la main, si les spécifications sont suffisamment exhaustives, précises et simples. Dans le cas contraire, on peut constituer un jeu d'exemples de différences et utiliser aussi les algorithmes d'apprentissage supervisé pour obtenir les règles de manière automatique.

Un exemple d'apprentissage correspond donc dans ce cas à un couple d'objets appariés, classé comme incohérent ou équivalent.

Seconde approche : prédiction et comparaison

Pour cette approche, la classification des différences n'est pas réalisée directement. Chaque représentation du couple est d'abord utilisée pour prédire la représentation de l'objet homologue dans l'autre base à l'aide des spécifications. Ceci est fait pour les deux bases. Ensuite, les représentations prédites et stockées sont comparées. Si elles sont identiques dans les deux cas, les représentations sont équivalentes.

Si elles sont différentes, les représentations sont incohérentes :

Prédiction

Si objet$_{BD1}$ = représentation$_i$ **ALORS** objet homologue$_{BD2}$ $\in$ {rep$_k$…rep$_n$}$_{prédite.}$
Si objet$_{BD2}$ = représentation$_j$ **ALORS** objet homologue$_{BD1}$ $\in$ {rep$_i$…rep$_m$}$_{prédite.}$

Comparaison et classification

Si représentation$_i$ $\not\subset$ {rep$_i$…rep$_m$}$_{prédite}$ **ALORS** la représentation$_i$ est incohérente.
Si représentation$_j$ $\not\subset$ {rep$_k$…rep$_n$}$_{prédite}$ **ALORS** la représentation$_j$ est incohérente.
Sinon, les représentation$_i$ et représentation$_j$ sont *équivalentes.*

Pour cette approche, en fonction de la disponibilité des spécifications et la richesse de leur description, les règles peuvent être écrites à la main ou acquises par apprentissage, comme pour l'approche précédente. Un exemple d'apprentissage dans ce cas est un couple d'objets appariés dont les classes à apprendre correspondent aux représentations à prédire.

Discussion sur les deux approches du contrôle inter-base

Bien que les deux approches aboutissent aux même résultats, leurs mises en œuvre présentent des différences importantes. La classification directe est la première approche que nous avons suivie lors de l'implémentation du processus. Elle semble moins bien adaptée que la seconde. L'introduction des règles à la main peut s'avérer rapidement impossible car la combinatoire peut être très importante. Pour y faire face, on peut avoir recours à l'apprentissage mais cela suppose de recueillir des exemples. Cette tâche est souvent fastidieuse car l'attribution d'une étiquette à chaque observable doit se faire interactivement.

Pour ces raisons, nous pensons que la deuxième approche est davantage opérationnelle. Si l'apprentissage est nécessaire, le recueil des exemples est immédiat. Aucune classification interactive n'est nécessaire puisque les données appariées suffisent à acquérir les règles de prédiction des représentations. De plus, en l'absence de spécifications, on peut apprendre les règles sans devoir recourir à un expert connaissant parfaitement les BD. Cette approche est donc plus avantageuse. Elle suppose néanmoins que les données ne contiennent pas trop d'erreurs de saisie car ces erreurs pourraient influencer les résultats de l'apprentissage.

Application : étude des différences entre ronds-points

Pour étudier la faisabilité des différentes approches proposées, nous avons développé une application portant sur les ronds-points de deux bases de données : la BD CARTO et GÉOROUTE. Nous avons analysé les correspondances entre les ronds-points et évalué la cohérence de leur représentation. Le processus a d'abord été mis en œuvre en considérant les spécifications comme suffisamment précises et exhaustives. Nous avons ensuite affiné les spécifications en suivant le processus présenté en figure B.6.4. L'ensemble des développements a été réalisé dans l'environnement OXYGENE, la plate-forme de travail du laboratoire COGIT [BADARD, BRAUN 03].

Étude des différences de représentation entre les ronds-points en présence de spécifications exhaustives

Le processus suivi dans cette partie est celui illustré en figure B.6.3 (page 73). Nous décrivons brièvement ci-dessous les différentes étapes.

Étape 1 : analyse des spécifications

La représentation des ronds-points dans les deux bases de données étudiées est guidée par la taille du diamètre de l'objet sur le terrain. Les différents seuils décrits dans les spécifications sont illustrés dans la figure B.6.5, page suivante. On remarque que les critères de saisie sont différents et qu'on peut donc s'attendre à un ensemble de différences entre les données qui seront tout à fait justifiées : les équivalences. On suppose aussi que certaines correspondances seront anormales, celles résultant d'erreurs de saisie ou d'appariement : ce sont les incohérences.

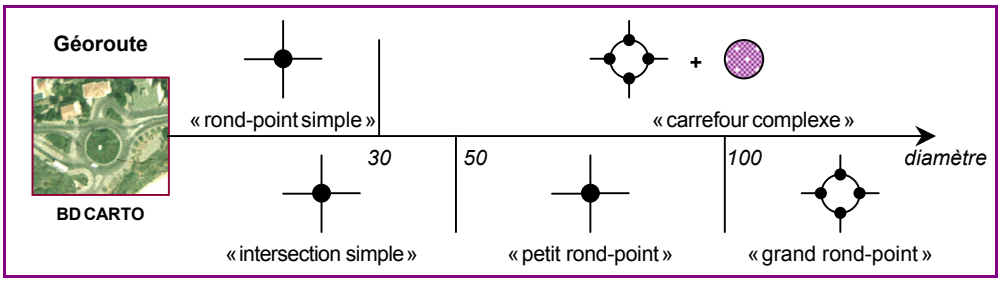


figure B.6.5 *: extrait des spécifications relatives aux ronds-points des deux bases étudiées*

Étape 2 : enrichissement des données

D'après les spécifications, on peut remarquer que l'objet « rond-point » n'existe pas explicitement dans les données de la BD CARTO. Il s'agit d'un ensemble d'arcs et de nœuds connexes et il faut donc l'extraire. Dans GÉOROUTE par contre, il existe une classe d'objets « carrefour complexe » dans laquelle sont stockés les ronds-points. Le phénomène est donc représenté dans la base mais nous avons également procédé à son extraction. Nous pouvons de cette manière détecter d'éventuelles erreurs d'incomplétude ou d'excédent.

Sans entrer dans les détails de l'étape d'enrichissement, mentionnons simplement que les ronds-points ont été détectés sur un critère de forme, en utilisant un indice de circularité. Pour GÉOROUTE, une comparaison des objets créés avec ceux existants dans la classe « carrefour complexe » a été menée. Les carrefours complexes de forme non circulaire ont été importés. Les spécifications indiquent en effet que la forme circulaire du rond-point n'est pas le seul critère de sélection de l'objet dans la base. La présence d'un terre-plein central infranchissable est un autre critère non détectable à partir des données (figure B.6.6).

figure B.6.6

Création des ronds-points dans GÉOROUTE *:*
extraction des faces circulaires puis importation des carrefours complexes non circulaires.

Étape 3 : contrôle intra-base

Un premier contrôle de la représentation des ronds-points dans chaque base indépendante a été effectuée à ce niveau. Nous avons vérifié que le diamètre de chaque rond-point, de même que le sens du cycle et le nombre de nœuds pour la représentation détaillée, respectaient bien les spécifications. Les règles élaborées lors de l'analyse des spécifications ont été activées automatiquement par le système-expert. Pour *GÉOROUTE*, nous avons également vérifié que les ronds-points permettant de faire demi-tour en bout d'impasses étaient saisis en « intersection simple ». Un certain nombre d'erreurs à cette étape ont été détectées.

Étape 4 : appariement

Les ronds-points ont été appariés en utilisant une méthode fondée sur des critères de distance et d'intersection. Bien que très simple, cette méthode donne de bons résultats. Nous avons pu évaluer interactivement sur un échantillon de 124 couples, un taux d'erreurs de 8%. La détection des erreurs d'appariement est essentielle puisque ces erreurs sont susceptibles de fausser les résultats de l'interprétation des différences. Afin de détecter ces erreurs de manière automatique et de valider les couples d'objets appariés, nous avons ensuite appliqué une autre méthode d'appariement, celle proposée par [DEVOGELE 97]. Cette méthode se fonde sur d'autres critères pour calculer les correspondances, en particulier, des critères topologiques. À l'issue de cette étape, sur les 690 couples initialement calculés, 89% des correspondances ont été retenues, celles présentant une réponse identique en appliquant les deux méthodes. Le processus n'a été poursuivi qu'avec ces couples jugés certains.

Étape 5 : contrôle inter-base

Il restait à étudier les différences de représentation en utilisant la modélisation des deux bases de données. L'approche de prédiction suivie de la comparaison a été retenue (cf. chapitre précédent). À nouveau, l'ensemble des règles relatives à cette étape et introduites à la main a été activé par le système-expert. Nous donnons un exemple de règle page suivante.

Prédiction de la BD CARTO à partir de GÉOROUTE

```
Si couple = appariement certain
Et si natureObjetGÉOROUTE = surface
Et si diamètreSurface < 50
Alors ObjetBDCARTO = carrefour simple
```

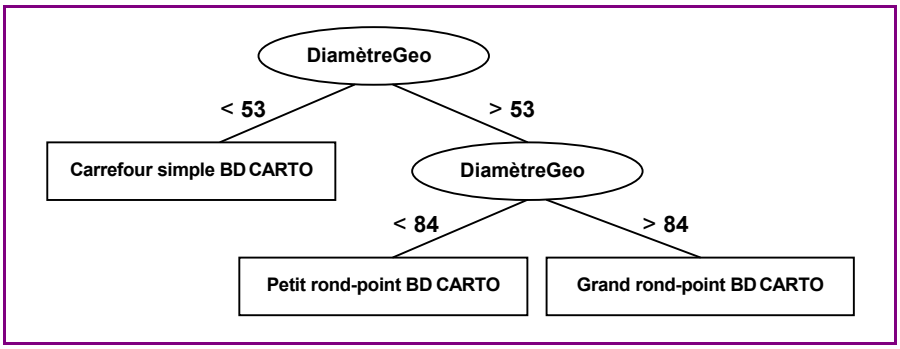
À l'issue de cette étape, tous les couples d'objets appariés étaient qualifiés en terme d'incohérence et d'équivalence. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

Raffinement des spécifications

Nous avons également étudié les différences de représentation entre les ronds-points en appliquant le processus adapté aux spécifications imprécises (celui décrit en figure B.6.4). Notre objectif consistait cette fois à raffiner les spécifications et classer les différences de manière plus « réaliste », c'est-à-dire, en ne tenant pas compte des seuils théoriques, mais plutôt, des seuils constatés dans les données.

Les premières étapes furent similaires à celles décrites précédemment. L'apprentissage n'a été mise en œuvre que pour le contrôle inter-base. Trois cent trois couples d'objets appariés automatiquement ont joué le rôle d'exemples d'apprentissage. Nous présentons ci-dessous l'arbre de décision appris avec C4.5. [QUINLAN 93] permettant de prédire les représentations des objets de la BD CARTO, à partir de celles de GÉOROUTE.

Prédiction de la BD CARTO à partir de GÉOROUTE



Les résultats de cet apprentissage sont intéressants car ils permettent de constater que le seuil de passage d'une « intersection simple » à un « petit rond-point » dans la BD CARTO correspond à 53 mètres pour le jeu de données étudié, plutôt qu'à 50 mètres tel qu'il est fixé dans les spécifications. De même, on apprend que le seuil de passage à une représentation détaillée est de 84 mètres au lieu de 100 mètres. Ceci s'explique par le fait que les opérateurs de saisie ne respectent pas rigoureusement les seuils lors de production des données. Ces seuils sont fixés pour leur donner un ordre de grandeur mais ne jouent pas le rôle de contraintes d'intégrité. Ceci ne veut pas dire qu'il n'existe jamais des données hors spécifications. En deçà de ces seuils, les représentations sont erronées et donc incohérentes. Par exemple, une représentation détaillée d'un rond-point dans la BD CARTO avec un diamètre de 70 mètres est une erreur. Nous donnons les résultats des deux processus mis en œuvre ci-dessous.

Résultats

Les deux processus fournissent des résultats légèrement différents (tableau B.6.1, page suivante). Ceci est normal puisque les valeurs de seuils utilisés ne sont pas les mêmes : dans un cas, elles proviennent des spécifications théoriques, dans l'autre, elles sont issues des données.

On peut constater que l'interprétation n'a porté que sur 259 couples. Nous avons en effet éliminé les appariements incertains et nous avons écarté les appariements de type « 0-1 » (un objet dans GÉOROUTE n'a pas de correspondant dans la BD CARTO). Ce type de lien ne peut pas être analysé car les absences d'intersections dans la BD CARTO découlent d'absences de routes. Il est donc nécessaire pour les valider, d'étudier la conformité de l'existence des routes.

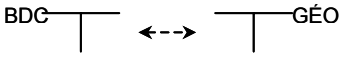
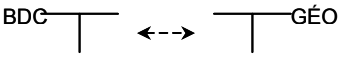
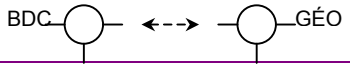
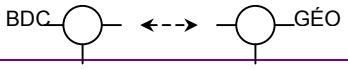
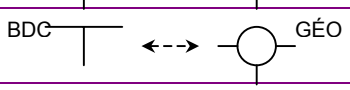
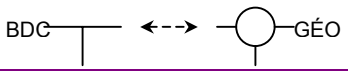
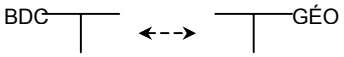
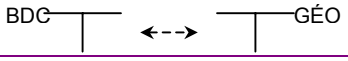
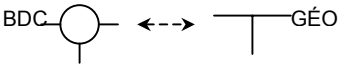
On trouve 33% d'incohérences pour le premier processus et 31% pour le deuxième. Ces chiffres sont relativement élevés mais on peut considérer, suivant le contexte d'utilisation des BD, que certaines erreurs sont plus graves que d'autres. Ainsi, par exemple, il est possible d'obtenir une incohérence si les deux représentations sont correctes, mais que le sens du rond-point détaillé dans GÉOROUTE n'est pas conforme (sens non giratoire). De même, si la correspondance avec l'objet « carrefour complexe » est non conforme (objet non créé par exemple), cela donne lieu également à une incohérence. On a donc vérifié les représentations en utilisant les deux BD, mais le résultat du contrôle intra-base est également exploité. Deux modélisations identiques peuvent ainsi être incohérentes.

En comparant les résultats des deux processus dans le tableau B.6.1, on remarque également que le nombre d'équivalences du type « point-surface » est moins élevé avec les spécifications issues des données. Cela s'explique par le fait que le seuil du diamètre est passé de 100 m à 84 m.

***tableau B.6.1** : résultats de l'interprétation des différences entre ronds-points*

Description des couples

- Nombre de couples appariés : **690**
- Nombre d'appariements incertains : **77**
- Nombre de couples non traités (hors erreur d'appariement) : **354** (liens 0-1 avec 1 dans GÉOROUTE)
- Nombre de couples interprétés : **259**

Processus (figure B.6.3) : spécifications théoriques		**Processus (B.6.4) : spécifications apprises**	
Équivalences : 173 soit **67%**		**Équivalences : 178** soit **69%**	
Type d'équivalence	**Nombre**	**Type d'équivalence**	**Nombre**
	2		**10**
	53		**50**
	**118**		**118**
Incohérences : 86 soit **33%**		**Incohérences : 81** soit **31%**	
Type d'incohérence	**Nombre**	**Type d'incohérence**	**Nombre**
	**14**		**6**
	**27**		**30**
	**40**		**40**
	1		**1**
liens 1-0 avec 1 ∈ BD CARTO	**4**	liens 1-0 avec 1 ∈ BD CARTO	**4**

Lorsqu'il existe une incohérence entre les représentations et que leur modélisation est ponctuelle, l'erreur peut provenir soit de la BD CARTO (le nœud est classé en « petit rond-point » au lieu d'être classé en « carrefour simple), soit de GÉOROUTE (la représentation est ponctuelle bien qu'elle devrait être détaillée). Pour ce cas, on constate qu'il existe une incohérence mais il n'est pas possible de préciser dans quelle BD existe l'erreur. Par contre, dans le cas d'une relation « point-surface » (le point appartenant à la BD CARTO), on peut interpréter l'incohérence plus finement. Ainsi, si le nœud est classé en « carrefour simple », et que le diamètre de GÉOROUTE mesure 75 mètres, on peut faire l'hypothèse que c'est le nœud qui est mal classé. Il est peu probable que le diamètre soit surévalué par rapport à la réalité, la saisie étant issue de clichés aériens. Nous mentionnons quand même les deux possibilités à l'issue de l'interprétation. Quelques illustrations d'incohérences et d'équivalences sont fournies à la figure B.6.7, page suivante.

Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons exposé une méthodologie pour évaluer la cohérence inter-représentations. Celle-ci repose sur l'utilisation des spécifications pour juger de la conformité des modélisations. Ces spécifications proviennent soit des documents existants, soit des données. Dans le premier cas, les critères de saisie sont explicites mais l'examen des documents est difficile. Une étude est actuellement en cours pour mieux formaliser les spécifications et faciliter ainsi leur analyse et leur comparaison (voir l'article B.7 de N. Gesbert, pages 81-86). Dans le deuxième cas, les spécifications sont implicites et il faut donc les apprendre, mais leur extraction à partir des données est plus intéressante car les critères de saisie sont plus justes, plus « réaliste ».

L'apprentissage artificiel ne doit pas être lancé « à l'aveugle ». Il est essentiel d'analyser les règles apprises et d'étudier leur cohérence. De même, il ne convient pas dans toutes les situations. Si les classes à apprendre sont numériques, les algorithmes nécessitent bien souvent une discrétisation préalable.

Dans ce cas, l'apprentissage est moins bien adapté car ce sont les seuils de la discrétisation qui seront fournis et non les valeurs réellement recherchées. Enfin, il faut s'assurer que les règles apprises sont suffisamment générales et ne « collent » pas trop aux données.

Le pouvoir inductif, c'est-à-dire la capacité de passer du particulier au plus général, est la caractéristique principal des algorithmes d'apprentissage. Néanmoins, si les données sont trop bruitées, si un grand nombre d'erreurs existent dans les données, on risque d'apprendre de fausses spécifications. Plusieurs problèmes d'utilisation de l'apprentissage restent donc à résoudre et nos recherches actuelles s'y consacrent.

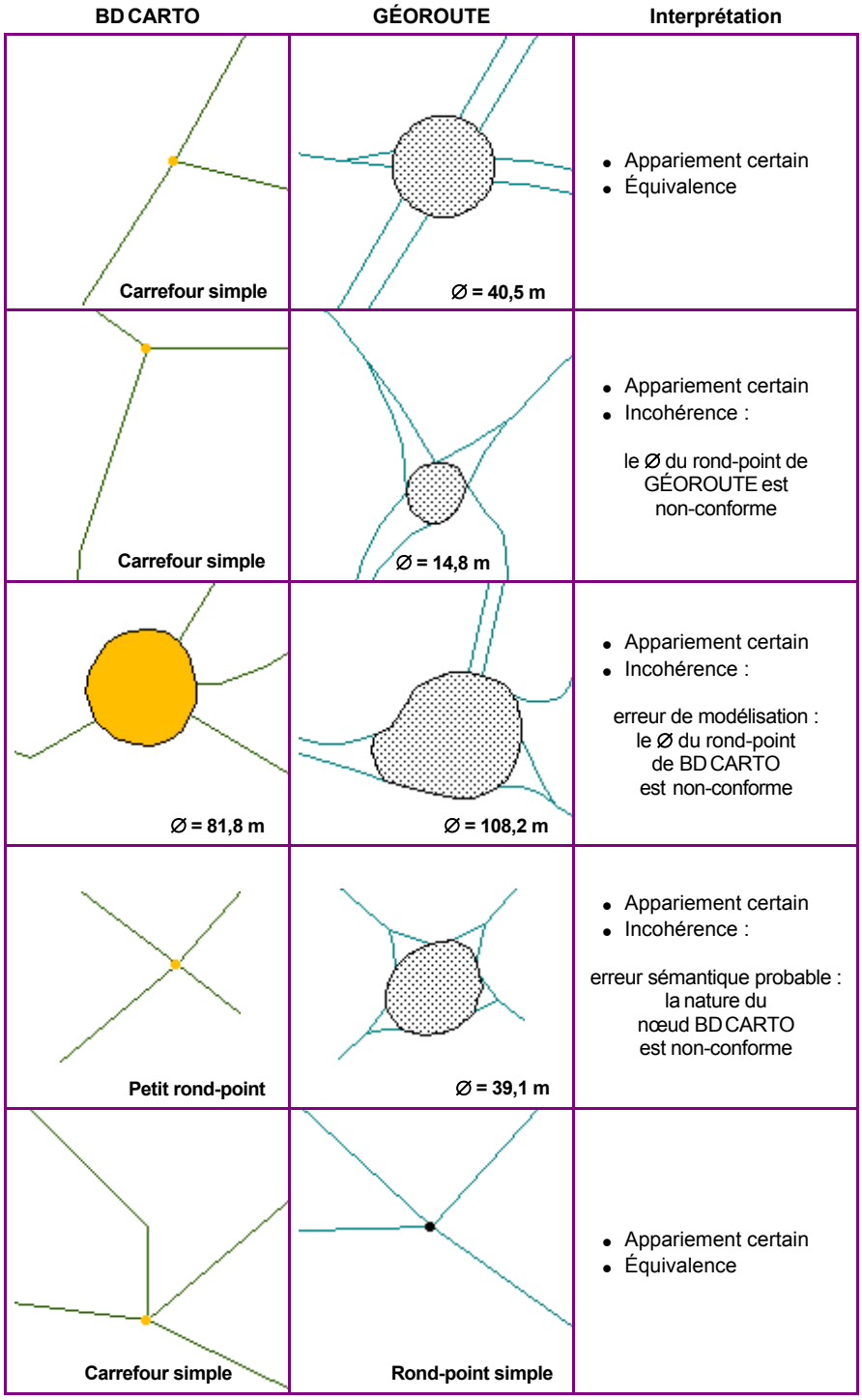


figure B.6.7 *: illustration d'incohérences et d'équivalences du jeu de ronds-points étudiés*

Références

[EGENHOFER et al 94] M.J. Egenhofer, E. Clementini and P. Di Felice : *Evaluating inconsistencies among multiple representations,* in Proceedings of the SixthInternational Symposium on Spatial Data Handling (SDH'94), Edimbourg, Scotland, pp. 901-920, 1994.

[EL-GERESY, ABDELMOTY 98] B.A. El-Geresy and A.I. Abdelmoty : *A Qualitative Approach to Integration in Spatial Databases,* in Proceedings of the 9th International Conference on Database and Expert Systems Applications (DEXA'98), Springer-Verlag, in Lecture Notes in Computer Science 1460, pp. 280-289, 1998.

[MITCHELL 97] T.M. Mitchell : *Machine Learning*, Singapour, McGraw-Hill International Editions, 414 p, 1997.

[PARENT, SPACCAPIETRA 01] C. Parent and S. Spaccapietra : *Database Integration : the Key to Data Interoperability*, in Advances in Object-Oriented Data Modeling, The MIT Press, 2001.

[QUINLAN 93] J.R. Quinlan : C4.5 : *Programs for machine learning*, Morgan Kaufmann, 1993.

[SESTER 00] M. Sester : *Knowledge Acquisition for the Automatic Interpretation of Spatial Data*, in International Journal of Geographical Information Science, 14(1), pp. 1-24, 2000.

[DAVID et al 93] J.-M. David, J.-P. Krivine and R. Simmons : *Second generation Expert Systems*, Berlin : Springer-Verlag Ed., 1993.

Publications

[BADARD, BRAUN 02] T. Badard & A. Braun : « OXYGENE » : *Une plate-forme inter-opérable pour le déploiement de services Web géographiques*, in Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n°74, Bilan de la recherche 2002, pages 113-121, laboratoire COGIT, IGN-SR 02-053-S-ART-TB, 2002.

[DEVOGELE 97] T. Devogele : *Processus d'intégration et d'appariement de Bases de Données Géographiques - Application à une base de données routières multi-échelles*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR-97-025-S-THE-TD, soutenue le 12 décembre 1997.

[MUSTIÈRE 01] S. Mustière : *Apprentissage supervisé pour la généralisation cartographique*, thèse de doctorat en Informatique de l'Université Pierre & Marie Curie (Paris-6), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-012-S-THE-SM, soutenue le 8 juillet 2001.

[MUSTIÈRE et al 01] S. Mustière, N. Gesbert & D. Sheeren : *Unification des bases de données géographiques*, in Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n°74, Bilan de la recherche 2002, pp. 71-78, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-057-S-ART-SM, 2003.

[MUSTIÈRE et al 03] S. Mustière, N. Gesbert and D. Sheeren : *A formal model for the specifications of geographic databases*, in Proceedings of the Workshop on Semantic Processing of Spatial Data (GeoPro'03), Edited by S. Levachkine, J. Serra and M. Egenhofer, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-024-S-COM-SM, 2003.

[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, pp. 151-168, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-020-S-ART-DS, 2002.

[SHEEREN 03a] D. Sheeren : *Spatial databases integration : interpretation of multiple representations by using machine learning techniques*, in Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC'03), laboratoire COGIT, IGN-SR-03-020-S-COM-DS, 2003.

[SHEEREN 03b] D. Sheeren : *Interprétation des différences de représentation d'un même phénomène géographique*, rapport intermédiaire de thèse, Université Pierre & Marie Curie (Paris-6), laboratoire COGIT, IGN-SR-03-009-S-RAP-DS, 2003.

[SHEEREN 04] D. Sheeren : *Apprentissage de concepts pour l'aide à l'interprétation des différences de représentation d'un même phénomène géographique,* in Bulletin du Comité Français de Cartographie (CFC), n°179, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-013-S-ART-DS, 2003.

B.7 Formalisation des spécifications des bases de données géographiques

Nils Gesbert

Introduction

La sémantique précise des objets contenus dans une base de données géographiques vecteur est décrite par les spécifications de cette base. Ces spécifications sont de volumineux documents texte et contiennent une grande quantité d'information qui n'est pas autrement accessible. Elles sont en particulier beaucoup plus riches que les schémas conceptuels des bases de données. En effet ceux-ci indiquent les types d'entités géographiques que contient la base, mais il n'est pas en général évident de savoir, parmi toutes les entités de ces types présentes sur le terrain, lesquelles exactement sont jugées suffisamment importantes pour apparaître dans la base : seules les spécifications détaillent les critères de sélection qui le déterminent. Dans le contexte de l'action de recherche « *Temps et niveaux de détail dans les bases de données géographiques* » du laboratoire COGIT, il nous est apparu que l'information précise contenue dans les spécifications était indispensable pour établir de façon cohérente des relations entre deux bases de données différentes. Mais pour pouvoir traiter cette information de façon automatique ou semi-automatique, il est nécessaire tout d'abord de l'exprimer de façon formelle et avec la même structure pour toutes les bases. Cet article présente une méthode pour y parvenir.

Nous espérons qu'un tel modèle permettra une meilleure compréhension des données, et en particulier qu'il facilitera la comparaison de plusieurs jeux de spécifications. L'application la plus importante en serait l'intégration de plusieurs bases de données géographiques à différentes échelles [DEVOGELE et al 98], qui pourrait mener à une base de données multi-représentation [VANGENOT 01]. Ce problème a déjà été abordé au laboratoire COGIT [DEVOGELE 97], mais directement au niveau des données elles-mêmes, c'est-à-dire en termes d'appariement géométrique. Il servira également à déterminer les incohérences entre les différentes bases [SHEEREN 05], en effet seules les spécifications peuvent nous permettre de savoir si une différence de représentation est normale et due à la différence de point de vue ou s'il s'agit d'une erreur ou d'une différence d'actualité des données.

Les bases et leurs spécifications

Les bases de données

Les bases de données auxquelles nous nous intéressons ici sont des bases de données géographiques vecteur. Nous travaillons sur l'exemple des bases de données de l'IGN (plus précisément, sur la BD CARTO et la BD TOPO Pays), mais l'application à des bases de données extérieures (produites par exemple par d'autres agences nationales) est envisagée. Ces différentes bases de données ont en commun la partie du monde réel qu'elles représentent (les entités géographiques permettant de décrire un paysage donné) et diffèrent essentiellement par le point de vue avec lequel elles la représentent, en particulier par l'échelle ou plus exactement la résolution.

Certains concepts géographiques n'ont un sens qu'à certaines résolutions, par exemple, il est impossible de définir la limite d'une forêt à un mètre près ou d'en individualiser les arbres à une résolution de vingt mètres. D'autres peuvent exister à toutes les résolutions considérées, mais leurs instances changent de nature : ainsi un fleuve peut se diviser en plusieurs bras, formant un réseau complexe, quand on le regarde à cent mètres près, mais ne plus former qu'une simple ligne à une résolution d'un kilomètre car les petites îles ne sont plus visibles. En quelque sorte, les entités qui constituent le terrain à différentes résolutions correspondent à ce qu'on voit depuis différentes distances : face à un mur, on voit des briques. Depuis le sommet d'une colline, on peut apercevoir une ville. C'est pourquoi les diverses bases de données ne contiennent pas exactement les mêmes types d'entités.

Il est alors commode, notamment dans l'optique de l'unification et de la réalisation d'une base de données multi-échelles, de considérer qu'il existe un unique « terrain conceptualisé » dont les diverses bases représenteraient des vues. Nous utilisons le terme de « terrain conceptualisé » pour mettre en valeur le fait qu'on ne s'intéresse pas directement au terrain physique en tant que tel mais à l'ensemble des entités géographiques qu'on sait reconnaître sur ce terrain, certaines de ces entités pouvant ne correspondre à aucun objet physique facilement définissable (ainsi par exemple une baie ou une péninsule) [SMITH, MARK 98]. Les bases représentent des vues de ce terrain conceptualisé, c'est-à-dire une partie de ces entités vues à une certaine résolution. Les spécifications de chaque base indiquent quelles entités exactement sont représentées, avec quelle résolution et comment.

Les spécifications

Les spécifications dont nous disposons à l'IGN ont toutes une structure relativement similaire : chaque classe du schéma conceptuel de la base concernée correspond à une section (voir : exemple figure B.7.1, page suivante) découpé en quatre parties. Tout d'abord : une partie *définition* qui précise le type général d'entités représenté par cette classe. Ensuite, une partie *sélection* permet de restreindre l'extension de la classe en précisant les critères qui décident si une entité du terrain doit ou non être conservée comme instance de la classe.

Une autre partie : *modélisation géométrique* indique comment générer la géométrie de l'instance créée à partir de l'entité du terrain. Cette partie fait implicitement intervenir la résolution, qui est normalement indiquée dans les spécifications générales avec d'autres méta-données. Elle est parfois mentionnée explicitement si pour cette classe particulière elle diffère de la spécification générale. Enfin, une partie *attributs* regroupe les descriptions des attributs autres que la géométrie.

On constate que ces spécifications donnent l'information dans le sens de la lecture de la base de données (comme la légende d'une carte), c'est-à-dire qu'il est relativement aisé, étant donné un objet de la base, de savoir à quoi il correspond dans la réalité : on regarde la spécification correspondant à sa classe, qui nous liste toutes les possibilités. Mais si l'on cherche à retrouver dans la base un objet réel, il est nécessaire de consulter l'index (à supposer que celui-ci existe, ce qui n'est pas toujours le cas, et qu'il soit complet) pour trouver la ou les classes concernées, puis de chercher dans les spécifications correspondantes si et comment notre objet peut être représenté. Autrement dit, l'information n'est pas directement accessible.

Définition
Portion de cours d'eau, réel ou fictif, permanent ou temporaire, naturel ou artificiel, homogène pour l'ensemble des attributs et des relations qui la concernent, et qui n'inclut pas de confluent.
Regroupement : Voir les différentes valeurs des attributs <nature> et <artificialisé>.
Sélection
Le réseau hydrographique composé des objets <tronçon de cours d'eau> est décrit de manière continue.
La continuité du réseau n'est toutefois pas toujours assurée dans les cas suivants :
- arrivée d'un cours d'eau en ville
- infiltration d'un cours d'eau (ex. perte en terrain calcaire)
- arrivée d'un petit ruisseau temporaire dans une large plaine où son tracé se perd
- zones de marais où les connexions et interruptions du réseau restent indicatives

Tous les cours d'eau permanents, naturels ou artificiels, sont inclus.
Les cours d'eau temporaires naturels sont inclus, à l'exception des tronçons de moins de 200 m situés aux extrémités amont du réseau.
Les cours d'eau temporaires artificiels ou artificialisés sont sélectionnés en fonction de leur importance et de l'environnement (les tronçons longeant une voie de communication sont exclus, ainsi que les fossés).
Les talwegs qui ne sont pas marqués par la présence régulière de l'eau sont exclus.
Tous les cours d'eau nommés de plus de 7,5 m de large sont inclus (tronçon de cours d'eau d'attribut <fictif> = « oui » superposé à un objet de classe <surface d'eau>).
Fossé : Les gros fossés de plus de 2 m de large sont inclus lorsqu'ils coulent de manière permanente. Les fossés dont le débit n'est pas permanent sont sélectionnés en fonction de l'environnement. Ils sont généralement exclus lorsqu'ils longent une voie de communication.
Modélisation géométrique
A l'axe et à la surface du cours d'eau (tel qu'il se présente sur les photographies aériennes).
L'orientation de l'objet définit le sens d'écoulement. Elle n'est pas significative dans les zones très plates (ex. marais) ni pour les canaux.
[...]
Attribut** : **Nature
Définition : *attribut permettant de distinguer les tronçons de cours d'eau libres des obstacles*
Type *: liste*
Valeurs d'attribut *: cours d'eau indifférencié / barrage / cascade / écluse*
[...]

figure B.7.1 *: extrait des spécifications de la BD TOPO Pays*

Comment formaliser ?

Contraintes de sélection

On a vu qu'une grande part des spécifications est consacrée à la *sélection* des entités importantes parmi les entités d'un type donné. Nous nous sommes donc consacrés tout d'abord à cette partie. Les critères de sélections peuvent être représentés comme des contraintes sur l'entité du terrain, que cette entité doit respecter pour être représentée.

On peut répertorier trois types de contraintes de sélection élémentaires, pouvant être combinées par des opérateurs logiques pour obtenir des contraintes complexes [MUSTIÈRE et al 03] :

- des contraintes géométriques, les plus fréquentes : elles indiquent que telle ou telle dimension (largeur, surface, hauteur...) de l'entité doit être supérieure – ou éventuellement inférieure – à un seuil donné ;
- des contraintes portant sur des propriétés de l'entité autres que la géométrie (par exemple : pour un cours d'eau, « être navigable ») ;
- des contraintes portant sur le contexte de l'entité, c'est-à-dire sur ses relations avec d'autres entités, ces autres entités pouvant être de même échelle (ainsi « un petit bâtiment est inclus s'il est isolé » est une contrainte de relation entre le bâtiment et d'autres bâtiments) ou non (ainsi « les petits bâtiments situés en ville sont exclus » est une contrainte de relation entre le bâtiment et la ville, qui est un concept d'échelle inférieure à celle du bâtiment). On distingue encore, parmi ces contraintes de relation, les contraintes métriques (être à moins d'une certaine distance de), les contraintes topologiques (être à l'intérieur de, au bord de) et les autres contraintes de relation difficiles à formaliser plus avant (comme « mener à »).

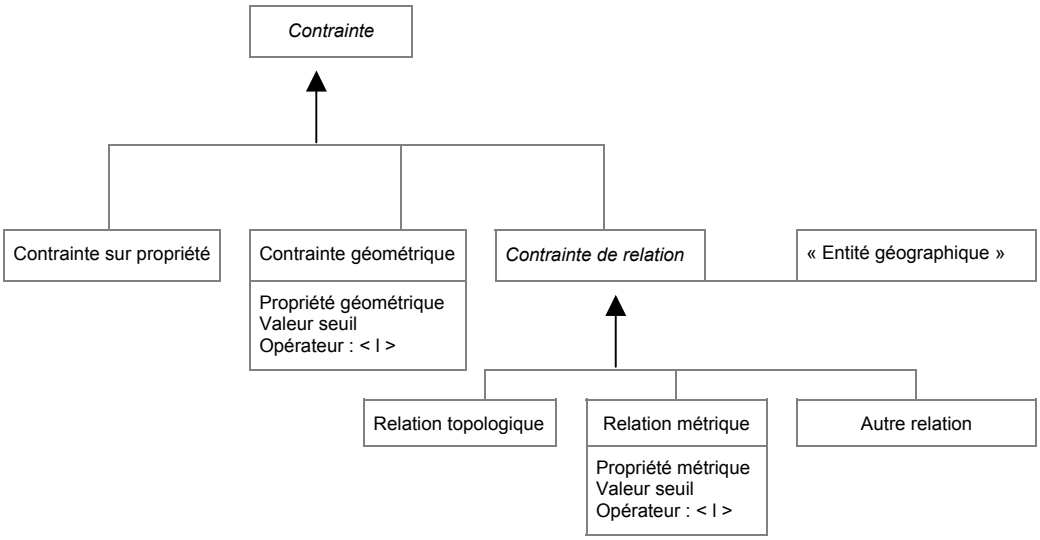


figure B.7.2 *: modèle UML représentant les différents types de contraintes rencontrés*

Modèle du terrain conceptualisé

La solution la plus simple pour formaliser l'ensemble des spécifications à partir du modèle de contraintes proposé ci-dessus consisterait à relier chaque classe du schéma de la base à une contrainte de sélection : on suppose que la classe correspond à un concept géographique unique et bien défini, décrit par la définition générale donnée par les spécifications. On décrit alors une contrainte de sélection portant sur les entités recouvertes par ce concept. Ceci revient en quelque sorte à utiliser tout d'abord le schéma conceptuel de la base pour classifier les entités du terrain, puis à opérer une sélection à l'intérieur de chacune des classes pour obtenir le contenu théorique de la base de données.

Cependant, on se rend compte que classifier les entités du *terrain* à l'aide du schéma conceptuel de la *base* pose divers problèmes, qui vont nous conduire à introduire un autre schéma conceptuel pour le terrain, indépendant de celui de la base :

- les regroupements en classes ne sont pas les mêmes dans toutes les bases, ce qui pourrait poser des problèmes pour la comparaison de spécifications. Par exemple, dans la BD CARTO, la classe « Tronçon de cours d'eau » comprend les aqueducs, mais dans la BD TOPO Pays, ceux-ci sont regroupés dans la classe « canalisation » avec les oléoducs et les gazoducs. Il est donc préférable de considérer séparément les aqueducs, bien que ce concept ne corresponde pas en lui-même à une classe, plutôt que des « tronçons de cours d'eau » dont les définitions seraient différentes entre les deux bases ;
- d'autre part, les modalités de sélection font fréquemment référence au contexte des objets et de ce fait recourent à des concepts extérieurs, non modélisés en tant que tels dans la base de données : ainsi, dans notre exemple de la figure B.7.1, « arrivée d'un cours d'eau *en ville* » ou « zone de marais ». Nous aurons besoin pour formaliser les spécifications de ces concepts de ville et de marais, qui ne sont pas dans le schéma de la base de données ;
- enfin et surtout, les spécifications des classes mélangent parfois des conditions sur les entités du terrain et des conditions sur les objets de la base eux-mêmes. Ainsi, le tronçon hydrographique ou le tronçon routier sont le résultat d'un découpage qui fait en général intervenir les attributs de l'*objet*. Mais il n'est pas possible *a priori*, en regardant le terrain, de déterminer exactement où sont les « tronçons de route » et d'opérer ensuite une sélection parmi eux : un tel concept n'est pas utilisable pour la classification *a priori* des entités du terrain.

Description du modèle de représentation des spécifications

Nous avons vu que les critères de sélection peuvent être représentés comme des contraintes portant sur les divers types d'entités du terrain, mais qu'il n'est pas possible de considérer que chaque classe de la base correspond à un type d'entité. Ceci nous amène à proposer la réalisation d'un second schéma, indépendant du schéma conceptuel de la base, regroupant les concepts utilisés dans les spécifications. Ce schéma représentera donc le contenu du terrain conceptualisé tandis que le schéma conceptuel de la base représente le contenu de la base. Les spécifications sont alors représentées dans des liens reliant les classes d'entités du terrain aux classes d'objets de la base. Nous avons représenté cette structure sous la forme d'un modèle UML. Nous aurons donc trois parties : l'une correspondant au schéma actuel de la base de données, la seconde au terrain conceptualisé et la troisième au processus de sélection/modélisation. On peut noter que, selon la définition de [GRUBER 93], la deuxième partie de notre modèle, qui spécifie la conceptualisation du terrain, représente une ontologie : la spécification d'une conceptualisation – voir [GUARINO, GIARETTA 95] pour les différentes acceptions du terme « ontologie ». Le modèle UML présenté figure B.7.3, page suivante, est un méta-modèle : en l'instanciant, on obtient des modèles regroupant les éléments qui interviennent dans notre démarche, celui du schéma conceptuel des bases concernées, celui du terrain conceptualisé (ontologie) et enfin celui du processus d'appariement inféré. Précisons donc ces trois modèles.

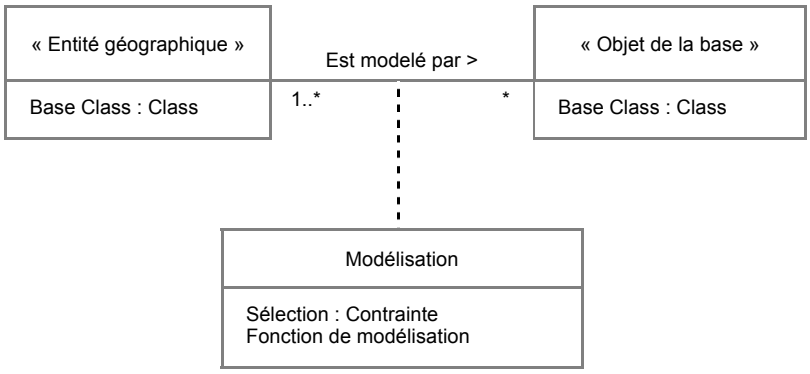


figure B.7.3 *: profil UML décrivant le modèle des spécifications*

Modèle conceptuel de la base

L'instanciation de la méta-classe « objet de la base » donne l'ensemble des classes de la base concernée. Par exemple, les classes « tronçon hydrographique » et « nœud hydrographique » de la BD Carto seront des instances d'« objet de la base ».

Modèle du terrain conceptualisé

Cette partie est constituée d'une hiérarchie de classes représentant les concepts utilisés dans les spécifications, tels par exemple « ville » ou « cours d'eau ». Ces classes possèdent des propriétés dont la valeur peut éventuellement dépendre de la position considérée à l'intérieur de l'instance (par exemple, pour une rivière, la largeur ou la navigabilité varient tout au long du cours), comme il est proposé dans le modèle MADS [PARENT et al 97]. On ne suppose pas les propriétés des entités du terrain conceptualisé directement accessibles : elles ne le sont qu'à une certaine résolution. Ici la résolution intervient comme une précision (par exemple, on prend la largeur d'une rivière à trois mètres près) et peut également indiquer un niveau de généralisation, par exemple : la représentation des lacets d'une route nécessite un traitement particulier à petite échelle. La largeur de la rivière avec une précision infinie ou le parcours exact de la route sont des abstractions qu'on ne peut utiliser telles quelles pour créer les objets de la base. D'un point de vue orienté-objet, ces propriétés correspondent donc à des méthodes plus qu'à des attributs, et la résolution est un paramètre de la méthode.

Liens entre les classes d'entités du terrain et les classes d'objets de la base

Les instances de la relation « Est modélisée par » relient une classe d'entités du terrain à une ou plusieurs classes d'objets de la base, indiquant qu'une entité appartenant à la première peut être représentée dans la base par un ensemble d'objets des secondes. À chacun de ces liens est attaché un élément « modélisation ». Cet élément comprend une contrainte de sélection du type décrit plus haut, indiquant, étant donnée une entité de la classe géographique considérée, sous quelles conditions elle sera effectivement représentée par des objets des classes de la base correspondantes, et une fonction de modélisation décrivant, lorsque la contrainte de sélection est respectée, comment les objets de la base et leurs attributs sont générés à partir des propriétés de l'entité.

Le formalisme qui sera utilisé pour représenter la fonction de modélisation reste à déterminer. On peut toutefois déjà dire qu'il sera nécessaire de définir un certain nombre de primitives, représentant en quelque sorte l'expertise de l'opérateur qui saisit les données, afin de ne pas aller trop loin dans la formalisation : il n'est pas utile pour ce que nous voulons faire, par exemple, de décrire en détail et de façon formelle le processus de restitution, il nous suffit de savoir que ce processus existe et qu'il est censé donner toujours les mêmes résultats à la précision près (et en particulier quelle que soit la base). On supposera donc par exemple l'existence de fonctions relativement simples, telles que « obtenir le contour de l'objet à la résolution [paramètre] », ou plus compliquées comme « extraire l'axe du réseau à la résolution [param1] en supprimant les culs-de-sac de longueur inférieure à [param2] ». Ces fonctions, les mêmes pour toutes les bases, serviront de briques élémentaires pour construire la description formelle de la fonction de modélisation.

Dans certains cas, la modélisation d'*une* entité correspond à la création de *plusieurs* instances d'une classe de la base. Un exemple typique en est le découpage en tronçons d'un cours d'eau ou d'une route. Le découpage ayant en général lieu aux changements d'attribut, ceci peut être représenté de la façon suivante : on indique la façon dont les attributs sont calculés à partir des propriétés de l'entité, dont il a été dit plus haut qu'elles pouvaient varier en fonction de la position considérée à l'intérieur de l'entité. On obtient donc des « attributs » dont la valeur est également variable. On peut alors dire que l'entité est découpée à chaque changement de valeur d'un de ces attributs, avec en général un paramètre d'agrégation indiquant que les changements sur de trop petites zones sont négligés. Une telle description est utile car le découpage en tronçons a toutes les chances de différer d'une base à l'autre. À l'aide de la liste des attributs provoquant le découpage et des paramètres d'agrégation, on devrait pouvoir déterminer facilement, si par exemple, l'un des découpages est une subdivision de l'autre ou non.

Exemples

La figure B.7.4 montre deux exemples d'instanciation de notre méta-modèle, pour le réseau hydrographique, respectivement dans la BD TOPO Pays et dans la BD CARTO. La partie bleue, correspondant au terrain conceptualisé, a été tout d'abord réalisée pour la BD TOPO – les concepts ayant été simplement déterminés par la lecture des spécifications à la recherche de mots-clefs – puis étendue et légèrement modifiée pour la BD CARTO. Les parties rouges correspondent aux classes des deux bases pour le thème hydrographie et les liens en pointillés sont les relations de modélisation. Le contenu des éléments « modélisation » correspondants (contrainte de sélection et fonction de modélisation) n'a pas été indiqué intégralement mais l'est partiellement sur certains liens, à titre d'exemple.

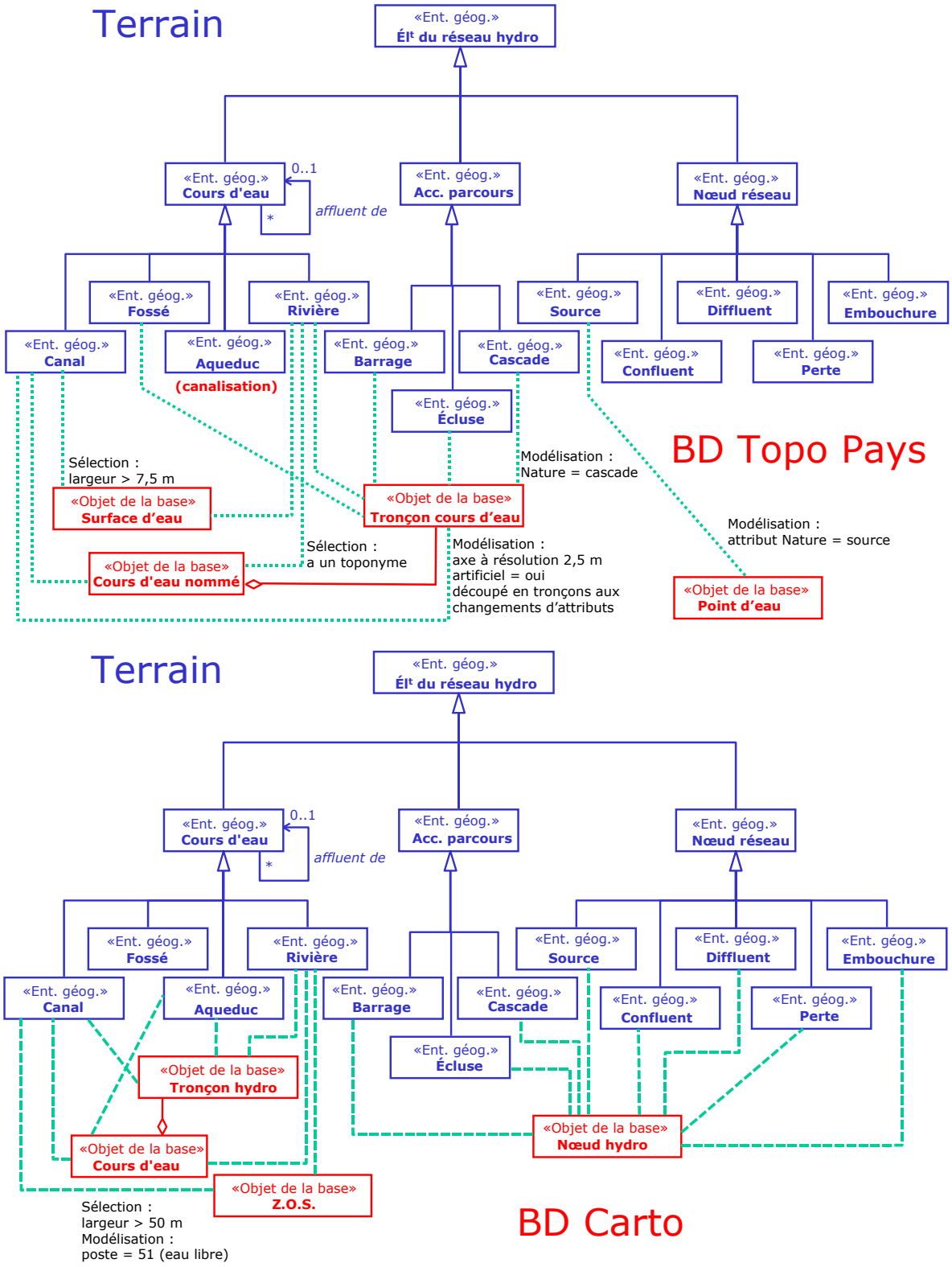


***figure B.7.4** : exemple d'utilisation du modèle pour le réseau hydrographique, sur la BD TOPO Pays et la BD CARTO*

Seules des modifications mineures ont été nécessaires pour adapter le modèle du terrain conceptualisé (partie bleue) de façon à pouvoir l'utiliser pour les deux bases, ce qui met bien en valeur le fait qu'au-delà des différences de modélisation, elles représentent une même réalité et en utilisant les mêmes concepts. Ainsi, par exemple, l'absence de classe « nœud hydrographique » dans la BD TOPO se traduit par le fait que les accidents de parcours y sont représentés par des *tronçons*, ce qui provoque une différence apparemment importante entre les structures des deux spécifications. Grâce à notre modèle, on peut voir immédiatement que cette différence n'est que superficielle et que les deux bases représentent bien les trois mêmes types d'accidents de parcours. Cette représentation des spécifications a également l'avantage de faire clairement apparaître la multi-représentation de certaines entités, ainsi, le fait qu'une rivière soit dans certains cas représentée simultanément par des tronçons et des surfaces est directement apparent sur le schéma.

Conclusion

Nous avons proposé dans cet article un modèle pour la représentation des spécifications de bases de données géographiques et leur intégration avec le schéma conceptuel de la base correspondante. L'intégration de bases de données, telle qu'on la conçoit en général et notamment dans le cas des bases de données classiques, comporte également la définition d'un schéma « médiateur » (vision globale et unifiée) et de correspondances entre schéma médiateur et schémas locaux des diverses bases, ou au moins, si l'on renonce à la vision globale, de correspondances entre les schémas locaux. Il s'agit en quelque sorte d'un appariement sémantique, et l'utilisation d'une ontologie joue un rôle important dans cette étape [PARTRIDGE 02]. Le but principal de notre modèle est de la faciliter.

Les résultats obtenus pour le réseau hydrographique sur deux bases sont encourageants (on réussit sans difficulté à utiliser le même modèle du terrain conceptualisé pour les deux), cependant il reste à fixer le formalisme pour la fonction de modélisation pour compléter le modèle, et à le tester sur des thèmes de nature différente, tel le bâti. Il sera également intéressant de regarder ce qu'on obtient avec des bases de données non IGN, en effet il est vraisemblable que l'utilisation des mêmes concepts dans les différentes bases de données de l'IGN est, au moins partiellement, liée à la culture commune de leurs concepteurs. Enfin, nous comptons réaliser une interface permettant de saisir et de manipuler ces schémas de spécifications.

Références

[GRUBER 93] T.R. Gruber : *Toward Principles for the Design of Ontologies used for Knowledge Sharing*, in Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation, Guarino and Poli (Eds), Kluwer Academic Publishers, 1993.

[GUARINO, GIARETTA 95] N. Guarino and P. Giaretta : *Ontologies and Knowledge Bases : Towards a terminological Clarification*, in Towards Very Large Knowledge Bases, Mars (Ed), IOS Press, Amsterdam, 1995.

[PARTRIDGE 02] C. Partridge : *The Role of Ontology in integrating Semantically heterogeneous Databases,* rapport technique n° 05/02, LADSEB/CNR, Padoue, 2002.

[SMITH, MARK 98] B. Smith and D.M. Mark : *Ontology and geographic Kinds,* in Proceedings of the Eighth International Symposium on Spatial Data Handling, Poiker and Chrisman (Eds), International Geographical Union, Geographic Information Science Study Group, 1998.

[VANGENOT 01] C. Vangenot : *Multi-représentation dans les bases de données géographiques*, thèse de doctorat de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.

Publications

[DEVOGELE et al 98] T. Devogele, C. Parent and S. Spaccapietra : *On spatial database integration*, in International Journal of Geographic Information Science, 12, n°4, laboratoire COGIT, IGN-SR-98-001-S-ART-TD,1998.

[DEVOGELE 97] T. Devogele : *Processus d'intégration et d'appariement de bases de données géographiques ; application à une base de données routières multi-échelles,* thèse de doctorat de l'université de Versailles, laboratoire COGIT, IGN-SR-97-025-S-THE-TD, 1997.

[MUSTIÈRE et al 03] S. Mustière, D. Sheeren and N. Gesbert : *A formal Model for the Specifications of geographical Databases,* in Semantic Processing of Spatial Data, in Proceedings of Workshop GeoPro'03, Levachkine, Serra and Egenhofer (Eds), laboratoire COGIT, IGN-SR 03-063-S-COM-SM, 2003.

[PARENT et al 97] C. Parent, S. Spaccapietra, E. Zimanyi, P. Donini, C. Plazanet, C. Vangenot, N. Rognon, J. Pouliot & P.A. Crausaz : *MADS : un modèle conceptuel pour des applications spatio-temporelles*, in Revue internationale de Géomatique, 7, n° 3-4, laboratoire COGIT, IGN-SR-97-010-S-ART-CP,1997.

[SHEEREN 05] D. Sheeren : *Étude de la cohérence inter-représentations, vers une meilleure intégration des bases de données spatiales,* in Bulletin d'Information Scientifique et Technique de l'IGN, n°75, Activité recherche 2003, 2005/1, pp. 71- 80, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-060-S-ART-DS, 2005.

B.8 Analyse d'évolutions topographiques élémentaires pour le suivi de phénomènes géographiques

Patricia Bordin

Introduction

À leur début, dans les années 1980, les SIG (Systèmes d'Information Géographiques) servaient essentiellement à l'inventaire des données existantes. Adoptés par les organisations pour constituer un observatoire de leur territoire, les SIG étaient une sorte d'outil fédérateur pour un état des lieux. Par la suite, les utilisateurs de SIG ont de plus en plus intégré les fonctionnalités d'analyse pour résoudre des problèmes de gestion ou d'études. Par ailleurs, les premiers SIG ont souvent exploité une représentation figée des territoires en raison des difficultés pour acquérir des données. Ainsi, les utilisateurs cherchaient avant tout à constituer leur base de données et reportaient à plus tard l'étude de la mise à jour. Cependant, l'expérience alliée à une plus grande maîtrise des outils ont fait émerger des besoins nouveaux, en particulier : les études spatio-temporelles ou études d'évolutions. Prolongeant les applications existantes, les études d'évolutions apportent un enrichissement en intégrant la dimension temporelle à la dimension spatiale.

La qualité des études d'évolution dépend de la modélisation de la dimension temporelle dans les bases de données et des analyses spatio-temporelles mises en œuvre. Avec une modélisation simple (coexistence de différentes versions des données), les SIG observatoires spatiaux deviennent spatio-temporels. Ils offrent les mêmes avantages, une meilleure connaissance du territoire et, parfois, la mise en évidence de nouveaux phénomènes localisés. Une demande importante des utilisateurs va dans ce sens aujourd'hui. L'intégration des fonctionnalités d'analyse spatiale peut une fois encore augmenter le potentiel des SIG. Avec une meilleure exploitation de ces fonctionnalités et une modélisation adéquate du temps et des phénomènes, les outils SIG et les données vectorielles qu'ils exploitent, pourront étendre leur champ d'application. Encore faut-il développer des méthodes permettant d'articuler les différents traitements disponibles et les nouveaux outils nécessaires à ces analyses.

Nos travaux conduits au sein de la nouvelle action de recherche : « *Analyse spatiale dans les domaines de la ville et des transports* » du laboratoire COGIT visent à développer des méthodes et outils d'analyse des évolutions. Ils établissent des liens entre des approches géographiques de phénomènes évolutifs urbains et des traitements de données géographiques élémentaires de mise à jour.

Ils cherchent ainsi à répondre à des questions comme :

- Où la ville évolue-t'elle ?
- Comment évolue-t'elle ?
- À quel rythme ?
- Comment comparer l'évolution de deux zones urbaines ?
- Existe-t'il des relations entre des changements géographiques ?
- Etc.

Pour cela nous nous intéressons aux relations pouvant exister entre différents niveaux d'observations et de descriptions. Ce qui suit montre comment l'approche multi-niveaux peut participer à des analyses multi-échelles des évolutions et comment nous l'avons couplée avec des mesures d'évolutions pour définir un processus de suivi de phénomènes géographiques à partir d'évolutions topographiques élémentaires.

Position des recherches au sein du laboratoire COGIT

Les récentes recherches sur l'étude des évolutions élémentaires pour le suivi de phénomènes géographiques évolutifs, viennent enrichir les recherches développées au laboratoire COGIT en incorporant l'approche thématique urbaine. La ville est en effet le territoire d'analyse privilégié dès le départ par ces recherches. Ces travaux ouvrent la voie à de nouvelles exploitations des outils d'analyse spatiale et des bases de données vectorielles mises à jour. Pour cela, nous nous appuyons sur des données issues de la BDTOPO, la base de données topographique de l'IGN à deux dates différentes.

Ces travaux profitent des recherches existantes développées au sein du laboratoire. Ils réinterprètent entre autre la méthode d'observation multi-niveaux proposée par [RUAS 99]. Ils vont à la rencontre des travaux sur l'analyse des changements et sur les mesures géométriques utilisés en généralisation. Ils bénéficient également du soutien du laboratoire de géographie *Parisgéo* [SANDERS 02].

Pour mener à bout la démarche d'analyse, nous n'avons considéré que les évolutions élémentaires de type *création* correspondant à l'apparition de nouveaux objets topographiques sur le territoire (exemple : construction d'un bâtiment, d'un tronçon de route) qui se traduisent par l'introduction d'une donnée dans la base de données.

Cependant, avec les travaux de [BADARD 00] sur l'analyse des changements géographiques, on pourra, par la suite, prendre en compte une classification plus riche des évolutions élémentaires (comprenant également : les destructions, les modifications sémantiques ou changements de valeur et/ou les modifications géométriques).

Par ailleurs, nous avons choisi d'exploiter des fonctions d'analyses courantes dans les SIG, en particulier, pour obtenir des mesures de caractéristiques géométriques et sémantiques nécessaires à la mesure des évolutions élémentaires. Nous espérons ainsi faciliter l'utilisation de ces travaux par le plus grand nombre et permettre ainsi plus rapidement aux utilisateurs d'étudier les évolutions. Cependant, nous pensons puiser ultérieurement dans la richesse des recherches effectuées au laboratoire COGIT, en matière de mesures géométriques.

Vers une modélisation adaptée à l'analyse des évolutions

Pour localiser les phénomènes géographiques évolutifs, on peut étudier les changements élémentaires à l'aide d'une base de données topographiques. Cependant, l'analyse de ces phénomènes implique de qualifier ces micro-changements dans une approche plus globale (macro). Par exemple, pour identifier une zone pavillonnaire, il ne suffit pas de constater qu'il y a des créations de nouveaux bâtiments. Il faut également les qualifier comme création d'habitats et les formaliser en tant que groupe pour définir une *zone pavillonnaire*. Ce constat nous a conduit à travailler sur l'intégration de données aux niveaux de détails (granularité) différents et sur l'articulation des niveaux d'analyses. Pour cela : nous avons utilisé une approche multi-niveaux.

Le principe de l'analyse multi-niveaux de [RUAS 99] propose de décrire l'espace géographique selon différents niveaux d'agrégation. Il emprunte à d'autres sciences (économie, géographie ou encore intelligence artificielle), la terminologie micro-méso-macro en leur donnant une interprétation adaptée au contexte de la généralisation :

- *« le niveau micro décrit les objets géographiques de précision sémantique et spatiale maximale » ;*
- *« le niveau macro permet de décrire les connaissances et les contraintes sur les populations d'informations, telles que l'ensemble des routes ou des bâtiments » ;*
- *« le niveau méso est le niveau intermédiaire, défini par une composante spatiale et une composante sémantique. Un objet méso est composé d'objets micro ou méso. Il peut posséder sa propre sémantique. Par exemple, un quartier est un objet méso composé de bâtiments et de rues. Un groupe de maisons peut être un autre objet méso sans posséder une dénomination particulière autre que groupe de bâtiments ».*

En résumé, le niveau micro concerne les unités, le niveau méso les groupes et le niveau macro concerne les populations.

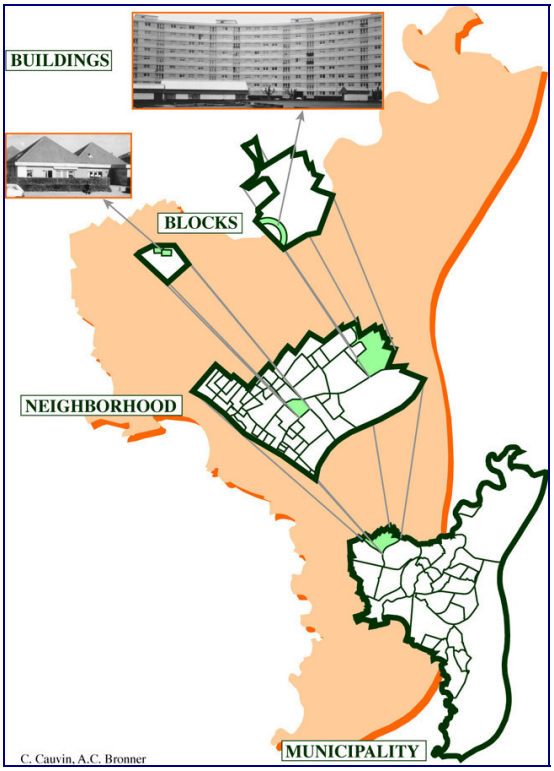


figure B.8.1 *: multi-représentation pour une analyse multi-échelles (figure extraite de* [CAUVIN 02])

On peut retrouver cette approche multi-niveaux (Cf. figure B.8.1) dans d'autres recherches, par exemple dans [CAUVIN 02]. Au laboratoire COGIT, [BOFFET 01] l'a utilisée pour créer des informations et plus récemment [BARD 04] pour établir une méthode d'évaluation de la généralisation. Elle nous a paru intéressante également pour nos recherches, un travail d'adaptation et de développement restant à faire pour prendre en compte la question des évolutions. Nous avons ajusté cette approche, pour faire correspondre chacun des niveaux à un niveau d'observation utile à notre analyse des évolutions.

Ainsi :

- le niveau micro regroupe l'ensemble des objets géographiques élémentaires. Dans l'état actuel de nos travaux, il concerne principalement les bâtiments et les tronçons de routes, extraits de la base de données topographique de l'IGN ;
- le niveau méso est formé d'objets géographiques composés d'objets micro ou d'objets méso. Par exemple : les îlots routiers, certaines zones d'études particulières comme les zones pavillonnaires ou zone industrielles ;
- le niveau macro qui regroupait précédemment l'ensemble des objets de même type, les populations, prend pour nous un sens plus général. Nos travaux exploitent pour l'instant peu ce niveau. Il sert essentiellement de cadre à l'analyse. Il se définit par les limites géographiques de l'étude, fixées en particulier par le jeu de données exploité. Il correspond actuellement à un agglomérat de communes urbaines. Cependant, dans le cas où les territoires d'études s'élargiraient, les villes ou agglomérations pourraient devenir objet méso, l'objet macro prenant alors la forme d'une région ou d'un pays.

Cette organisation des informations permet de considérer l'analyse de phénomènes géographiques avec celle des évolutions élémentaires dans une approche où les phénomènes seraient des objets méso tandis que les données élémentaires traduiraient des informations géographiques micro. L'approche multi-niveaux participe ainsi à l'analyse multi-échelles.

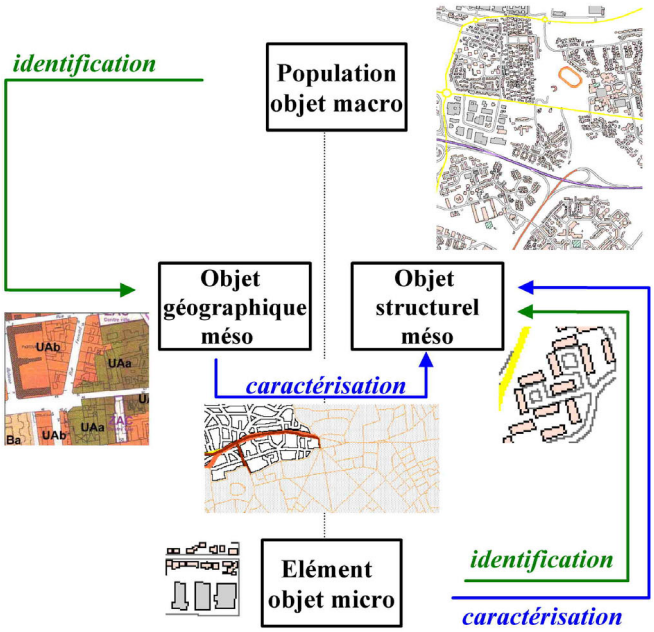


figure B.8.2 *: les objets méso : articulation entre deux niveaux d'observation*

Cependant avant de pouvoir décrire des évolutions au niveau méso en fonction du niveau micro, il faut formaliser un lien entre les deux niveaux d'observation. Pour cela nous distinguons deux familles d'objets au niveau méso (Cf. B.8.2) :

- les objets méso géographiques, que nous définissons comme les objets méso *géographiques par nature* au sens de [DIDIER 90], repris ensuite dans [BORDIN 03]. C'est-à-dire *« les objets intrinsèquement géographiques, au sens de ceux que l'on retrouve sur les cartes, ceux qui structurent l'espace, qui supportent les descriptions du monde, [...] cette vision de l'information géographique par nature se retrouve dans les deux autres termes qu'on lui associe parfois : données de base ou données support »* ;
- les objets méso structurels, par opposition, sont des objets méso définis indirectement, comme un ensemble cohérent d'objets micro ou méso (exemple : un groupe de bâtiments, une zone pavillonnaire, mais aussi un îlot défini à partir de l'ensemble des bâtiments qu'il contient, ou des tronçons de route qui le délimitent). On note que certains objets composites peuvent également être considérés comme des objets géographiques par nature (exemple : une zone industrielle existe à part entière).

Il est en effet important de constater qu'il existe des objets méso appartenant aux deux catégories (Cf. figure B.8.3). C'est le cas des îlots routiers. Ils sont objets géographiques, par nature, comme entités géographiques de référence pour de nombreuses statistiques, définis comme l'unité de surface minimale de la partition par le réseau routier. Ce sont également des entités structurelles définies par l'ensemble des objets qu'ils contiennent (exemple : les îlots pavillonnaires). Poser ces définitions préalables nous permet de faire coexister formellement deux approches différentes d'un même objet : l'objet comme un tout, l'objet comme la réunion de ses parties.

À partir de l'exemple des îlots, utilisés pour décrire un même territoire à deux niveaux d'analyse, méso et micro, (en caractérisant les phénomènes géographiques sur les îlots où ils se produisent et en analysant les objets élémentaires composant les îlots concernés), on voit comment ces objets peuvent servir de charnière à l'analyse des évolutions. Les changements micro des objets structurant l'objet méso-structurel-îlot vont pouvoir être *synthétisés* au niveau de l'objet méso-géographique-îlot pour qualifier les phénomènes évolutifs.

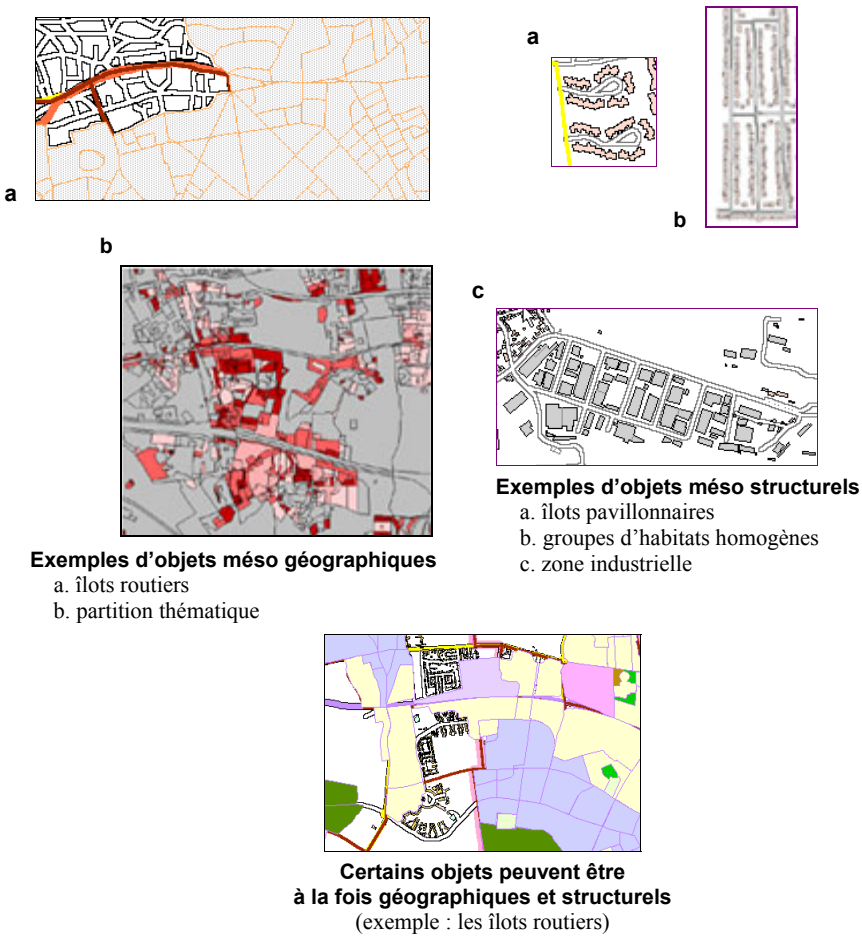


figure B.8.3 *: les objets méso : articulation entre les deux niveaux d'observation*

Études des évolutions

Pour étudier les évolutions de phénomènes géographiques (niveau méso) en fonction des évolutions élémentaires (niveau micro), il faut introduire la dimension temporelle dans le modèle d'analyse multi-échelles. Ce qui suit montre comment nous construisons des éléments de base pour mesurer les évolutions, la présentation de leur intégration et du processus d'analyse constituant la deuxième partie de ce paragraphe. Nous avons choisi de définir une évolution comme la différence entre les deux états d'une même caractéristique d'un objet géographique (figure B.8.4).

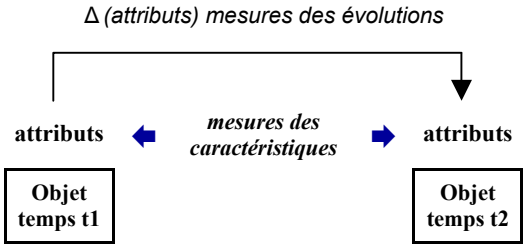


figure B.8.4 *: principe de calcul des évolutions*

Cette définition convient aux différents modèles d'intégration du temps dans les bases de données. En effet que l'on utilise un modèle simple consistant à enregistrer la totalité de la base à chaque mise à jour ou un modèle plus complexe d'historiques qui essaie de restituer l'histoire des évolutions de chaque donnée, il est possible d'extraire deux versions de la base de données. La difficulté réside dans la comparaison des données entre les deux états.

Si l'on parvient à apparier les données, il suffit d'étudier les variations entre les éléments de chaque couple. Mais dans le cas le plus général, une étape préliminaire est nécessaire pour identifier les couples d'évolutions. Pour éviter cette difficulté dans un premier temps, nous nous sommes limités aux évolutions de type *création* correspondant à l'apparition de nouveaux objets topographiques et à l'introduction d'une donnée dans la base de données. Cependant des travaux à l'aide de la plate-forme OXYGENE [BADARD, BRAUN 03] sont envisagés pour pouvoir travailler sur des évolutions plus diversifiées (exemple : modifications attributaires, fusion, scission).

Cette approche est par ailleurs applicable quel que soit le type d'objet étudié (micro, méso, macro). Elle vient ainsi compléter notre modèle d'analyse multi-niveaux pour étudier l'évolution de phénomènes géographiques à l'aide d'évolutions élémentaires (figure B.8.5, ci-dessous).

Les évolutions élémentaires

En choisissant de ne travailler que sur des évolutions élémentaires de type création, nous n'avons pas besoin de posséder des couples de données appariées, ni de calculer la variation des caractéristiques élémentaires. Toute variation différente de : (Ø → création) ne sera pas prise en compte dans cette analyse. Cette décision se justifie dans un premier temps, par l'importance relative de ce type d'évolution pour les objets étudiés (*bâtiments* et *tronçons de route*).

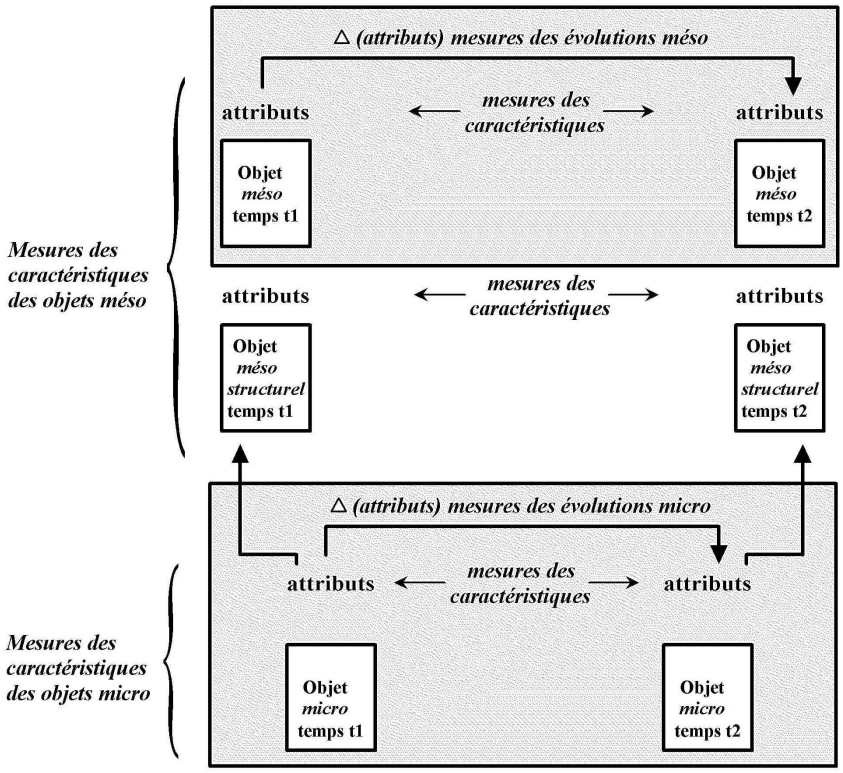


figure B.8.5 *: principe de calcul des évolutions à différents niveaux*

Les évolutions des objets méso structurels

Un objet méso structurel (exemple : un îlot routier) est défini en tant qu'ensemble des objets micro ou méso (exemple : les bâtiments) qu'il contient. On peut le caractériser par un certain nombre d'attributs déduits directement des caractéristiques de ses objets micro. Il s'agit par exemple de la forme générale du bâti, de sa surface moyenne, de l'homogénéité de cette surface, de la proportion d'espace vide, de la fonction principale du bâti, etc. Avec l'apparition (création) de nouveaux objets élémentaires, ces attributs voire sa nature peuvent changer.

Comme l'illustre la figure B.8.5, le calcul de leur variation permet alors d'établir une mesure d'évolutions méso structurelles. Par exemple, dans une zone au bâti discontinu, la création de nouveaux pavillons augmente la densité du bâti, peut diminuer sa surface moyenne et éventuellement transformer une zone d'activité de type petit artisanat en zone d'habitat.

La restriction aux *créations* pour l'étude des évolutions élémentaires, nous évite de prendre en compte les valeurs d'attributs au niveau micro. Cependant, pour l'analyse au niveau méso, il est nécessaire de connaître l'ensemble des caractéristiques des objets micro structurant un objet méso. En effet, elles sont utilisées (Cf. figure B.8.5) pour définir des attributs d'objets méso structurels. Par exemple : on ne travaille pas sur l'évolution élémentaire *modification géométrique* d'un bâtiment, mais on prend en compte sa surface aux dates t_1 et t_2 pour pouvoir calculer la surface moyenne du bâti au sein d'un îlot.

Les évolutions des objets méso géographiques

Un objet méso géographique possède des caractéristiques propres liées à sa composante géométrique (surface, forme, orientation, etc) et à sa composante sémantique. Ainsi, l'îlot peut être caractérisé par sa surface, sa fonction principale (exemple : habitat, activité commerciale ou industrielle, espace verts). Dans nos premières études de phénomènes géographiques, nous avons exploité le MOS (mode d'occupation des sols) de l'IAURIF (Institut d'Aménagement de la région Île-de-France). Cette base d'occupation des sols s'appuie sur une partition cohérente entre les différentes dates de numérisation. Elle permet de suivre l'évolution d'occupation des sols d'une parcelle à partir de l'évolution d'un attribut sémantique. Par exemple, une parcelle est codée comme zone boisée en 1982 et 1987, puis terrain cultivé en 1990 et zone d'habitat individuel en 1994 et 1999. Les évolutions méso géographiques prises en compte sont ici essentiellement sémantiques.

Un processus de suivi de phénomènes géographiques à l'aide d'évolutions élémentaires

Le rapprochement des deux types d'observations, montrent que les deux niveaux d'analyse sont bien complémentaires (Cf. figures B.8.6 et B.8.7, ci-dessous). Il peut y avoir un nombre important d'évolutions élémentaires sans que ne soient identifiées d'évolutions méso géographique (exemple : densification d'une zone industrielle). L'approche multi-échelles permet d'envisager une méthode d'analyse plus fine des phénomènes géographiques.

figure B.8.6 *: création d'une zone industrielle selon une approche méso et une approche micro*

figure B.8.7 *: différentes évolutions de zones pavillonnaires*

Le processus de suivi des évolutions que nous proposons part de ce constat. Utilisant deux jeux de données sur un même territoire, à deux dates différentes (extraits de la BDTOPO), nous calculons les évolutions élémentaires des objets de la base de données (exemple : les créations). Parallèlement, nous identifions les objets méso géographiques et nous leur faisons correspondre des objets méso structurels. Enfin, nous analysons les évolutions méso *héritées* des évolutions micro (évolutions de la surface moyenne du bâti, densité moyenne de l'îlot). Ces mesures d'évolutions associées directement aux objets méso structurels, permettent de décrire indirectement les objets méso géographiques par l'intermédiaire de l'objet méso structurel auquel il est identifié (par exemple : une zone industrielle identifiée à un ensemble d'îlots).

On peut ainsi analyser les évolutions méso pour répondre aux questions :

- Où la ville évolue-t'elle ?
- Comment évolue-t'elle ?
- À quel rythme ?
- Comment comparer l'évolution de deux zones urbaines ?

À un niveau d'observation moins global, on obtient également un processus de suivi plus fin de phénomènes évolutifs thématiques qui permet l'étude du mitage des zones périurbaines et de la densification du bâti, l'évaluation d'un programme d'aménagement du territoire. En effet, les mesures d'évolutions méso construites à partir de la synthèse des évolutions micro peuvent être utilisées pour quantifier ce type de phénomènes (Cf. figure B.8.6). Par ce processus, les SIG deviennent de meilleurs outils de suivi et de gestion. Ils permettent également d'anticiper certains changements d'occupation des sols (exemple : lorsque la densification du bâti fait évoluer un espace agricole en zone d'habitats).

Conclusion

Notre travail bénéficie de la mise à disposition des données élémentaires issues de la BD TOPO et nous profitons du savoir faire du laboratoire COGIT en matière de mesures géométriques. Les informations d'évolutions méso structurelles que nous exploitons portent essentiellement sur des résumés d'informations géométriques élémentaires. Cependant, nous envisageons d'améliorer le processus de suivi de phénomènes thématiques (exemple : développement d'une zone industrielle) en introduisant une étape d'enrichissement sémantique de ces données (exemple : secteur d'activité des entreprises implantées, nombre d'emplois, chiffre d'affaire réalisé, etc). Cela nous permettra de la même façon d'obtenir un résumé au niveau méso d'informations élémentaires plus thématiques (exemple : données sur les types de construction, de logements plus précise que le type de bâtiment industriel/quelconque).

En considérant la dimension temporelle sous forme de versionnement et en caractérisant les évolutions comme des variations entre deux états que l'on intègre dans une approche multi-niveaux, nous avons mis en place une méthode de suivi de phénomènes évolutifs à l'aide de données d'évolutions élémentaires. Nous l'avons appliquée aux évolutions élémentaires de type création. Ainsi, la synthèse d'une caractéristique (micro) des bâtiments contenus dans un îlot devient une caractéristique de l'îlot (exemple : variation de la surface moyenne du bâti). La différence entre deux états de cette synthèse devient alors une mesure d'évolutions méso-structurelle de l'îlot. En identifiant l'emprise géographique d'un phénomène avec celle d'un ensemble d'objets méso support, on peut alors utiliser les évolutions structurelles des objets supports (ici, les îlots) pour décrire l'évolution du phénomène.

La mise en œuvre de cette méthode est simplifiée lorsque les phénomènes sont déjà spécifiés, même partiellement dans la base de données, par exemple sous forme d'objet géométrique méso (exemple : zone d'activité industrielle) ou d'attribut de type occupation des sols (exemple : zone boisée). Elle doit démontrer son potentiel dans le cadre d'autres applications thématiques. Des travaux sont conduits dans ce sens. Un stage est en cours pour mettre en place une méthode de suivi du coefficient d'urbanisation. Il étudie l'évolution du coefficient d'urbanisation à partir des évolutions des données de la BD TOPO.

Références

[CAUVIN 02] C. Cauvin : *Cognitive and cartographic representations : towards a compréhensive approach*, in Cybergéo, n°206, 2002.

[DIDIER 90] M. Didier : *Utilité et valeur de l'information géographique*, in Economica, Paris, France, 1990.

[SANDERS 02] (sous la direction de) : *Modèles en analyse spatiale*, Hermès Éditeur, Paris, France, 2001.

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, soutenue le 15 décembre 2000.

[BADARD, BRAUN 03] T. Badard & A. Braun : *OXYGENE, d'une plate-forme inter-opérable au déploiement de services Web géographiques*, in Revue internationale de géomatique, vol. 13, n°3/2003, pp. 411-430, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-011-S-ART-TB, 2000.

[BARD 04] S. Bard : *Méthode d'évaluation de la qualité de données géographiques généralisées*, thèse de doctorat de l'Université de Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR-04-001-S-THE-SB, soutenue le 26 janvier 2004.

[BOFFET 01] A. Boffet : *Méthode de créations d'informations multi-niveaux, pour la généralisation cartographique de l'urbain*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-014-S-THE-AB, soutenue le 13 décembre 2001.

[BORDIN 02] P. Bordin : *SIG, concepts, outils et données*, Hermès Éditeur, Paris, France, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-029-S-LIV-PB, 2000.

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

B.9 Caractérisation d'erreurs sur un modèle numérique de terrain en fonction de zones morphologiques

Frédéric Rousseaux

Introduction

Dans cet article, nous traitons de l'impact des erreurs dans le cadre de simulations de risque. Les modèles numériques de terrain (MNT) sont souvent utilisés dans ce type d'applications sans que l'utilisateur ait quantifié l'impact de ces erreurs sur ses résultats de simulations [WECHSLER 99]. Selon [HOTTIER 90] et plus récemment [WISE 00], l'exactitude d'un MNT est liée au mode d'acquisition des données et à son mode de construction. Nous ne traitons pas ici des erreurs liées aux données qui ont servi à la construction du MNT. De nombreux travaux ont déjà montré l'importance de la précision des données initiales sur la qualité globale des MNT [CARTER 92] et [CHANG et al 91]. Par ailleurs, il a aussi été montré que le type d'interpolation choisi à partir du même type de données en entrée, donne des résultats similaires en termes de précision globale [CARRARA et al 97].

L'objectif de cet article est d'étudier la répartition spatiale, puis l'impact des erreurs qui sont récurrentes quel que soit le type d'interpolation choisi. Une erreur est la différence entre la mesure d'une grandeur et sa valeur réelle. À partir des mêmes données en entrée (courbes de niveau), nous comparons un MNT avec des valeurs de contrôle exogènes supposées plus « exactes » pour localiser, puis évaluer ces erreurs sur le MNT. Nous utilisons comme donnée altimétrique de référence un MNT à très haute résolution acquis grâce à la technologie LIDAR.

Nous supposons que la répartition spatiale des erreurs les plus importantes n'est pas dépendante du choix de l'interpolation mais du type de relief. Dans un premier temps, nous mettons en évidence la similarité des zones d'erreurs récurrentes sur différents types de MNT. Nous montrons, dans un second temps, l'impact des erreurs sur ces zones et leurs effets sur les principaux paramètres topographiques (altitude, pentes). Ces zones d'erreurs sont généralement liées à un manque d'information sur les structures importantes du terrain (crêtes, talwegs). Mais, même si il existe des méthodes pour résoudre ces problèmes [JAAKKOLA et al 00], elles ne sont globalement prises en compte que par une faible minorité d'utilisateurs [WECHSLER 99].

Nous concluons par une discussion sur les avantages qu'apporterait une caractérisation automatique d'un MNT. Réussir à déterminer de manière automatique certains types de formes permettrait à l'utilisateur de connaître automatiquement la qualité potentielle de son MNT en fonction de ces zones morphométriques. Cependant, une telle approche n'est possible qu'à partir d'une détection robuste donnant des limites de zones précises.

État de l'art des différents types d'interpolation à partir de courbes de niveau

Il existe plusieurs sources de données permettant la construction de modèles numériques de terrain. Les données les plus courantes sont issues généralement de courbes de niveau ou de corrélation à partir d'images satellitales. Nous n'étudierons dans cet article que les MNT construits à partir de courbes de niveau.

Si cette méthode de construction de MNT se généralise de plus en plus, c'est, selon [HEITZINGER et al 98], grâce au nombre croissant de cartes-papier peu chères, à différentes échelles, et intégrant une représentation des courbes de niveau. C'est aussi pourquoi de nombreuses agences nationales de cartographie, dont l'IGN, sur une partie du territoire, ont entrepris de créer des MNT à partir de la numérisation ou du scannage des courbes de niveau de leurs cartes existantes [AUMANN et al 90].

Pour construire un MNT, représentant une surface continue, à partir de ces données, il est nécessaire d'interpoler la surface du terrain. Il existe une distinction [MONIER 97] entre méthodes d'interpolation exacte (les données en entrée restent les mêmes après l'interpolation) et méthode d'interpolation non exactes (les données en entrée sont modifiées par la méthode d'interpolation). Les trois méthodes d'interpolation raster sont non exactes, contrairement à la méthode d'interpolation TIN.

Nous présentons ci-dessous très brièvement deux méthodes d'interpolation raster et une méthode d'interpolation TIN. Il existe de nombreux articles et thèses concernant ce sujet [BURROUGH et al 98] et [WOOD 98] ainsi que de nombreux sites Internet permettant de télécharger les algorithmes décrits.

Choix des méthodes d'interpolation

Très utilisés dans les années 90 grâce à leur simplicité d'usage et de traitement, la plupart des algorithmes d'analyse sont programmés pour le format raster. Néanmoins, ce format présente quelques désavantages. Le premier concerne la taille de la cellule : elle conditionne la taille du fichier et surtout la qualité du résultat. Le second concerne la difficulté des rasters à bien représenter les lignes de rupture de pentes. Enfin, d'un strict point de vue applicatif, les MNT raster gèrent assez mal les chemins d'écoulement [MOORE et al 91] à cause d'un effet de zigzag qui n'existe pas sur le TIN.

Nous proposons de choisir deux méthodes d'interpolation raster : La méthode IDW (Inverse Distance Weight) qui est une méthode d'interpolation classique, implémentée dans de nombreux SIG du marché. Nous choisissons aussi la méthode Regularized Spline with Tension (RST). Par rapport à la méthode IDW, elle présente un aspect plus réaliste, bien que parfois trop lissé. Les méthodes RST et IDW sont deux méthodes standard, susceptibles d'être utilisées par de nombreux utilisateurs de MNT. Leurs résultats sont représentatifs du type de modélisation que peuvent obtenir des utilisateurs de MNT.

Concernant le choix de la méthode d'interpolation exacte, la principale méthode utilisée est la fameuse triangulation de Delaunay. Le résultat n'est plus une grille régulière, mais un réseau de triangles irréguliers reliant un ensemble de points en nombre fini. Le MNT est calculé à partir de cet ensemble de points. Comme pour les MNT raster, ces points sont aussi ceux de construction des courbes de niveau. Contrairement au MNT raster, le TIN n'est interpolé qu'à partir des points existants. Il s'agit ici d'une tesselation irrégulière. La triangulation de Delaunay est définie comme l'ensemble dual du diagramme de Voronoï d'un ensemble de nœuds. Chaque triangle de la triangulation de Delaunay satisfait le critère du cercle vide. Cela signifie que le cercle circonscrit au triangle ne contient aucun nœud de la triangulation autre que les trois sommets définissant ce triangle. Une abondante littérature existe sur la triangulation de Delaunay et ses différentes méthodes algorithmiques. On citera par exemple la thèse de [ROGNANT 00].

Détermination des zones d'erreurs récurrentes

Nous montrons dans cette partie que la répartition spatiale des erreurs les plus importantes est indépendante du choix de l'interpolation. Nous définissons par erreur la différence entre l'altitude de référence et l'altitude mesurée sur le MNT. Dans un premier temps, nous localisons les erreurs qui affectent le plus les différents MNT. Puis nous mettons en évidence la similarité des zones d'erreurs récurrentes par la comparaison des différents MNT. Nous précisons que nos différents MNT ne présentent pas de biais planimétriques.

Matériel et méthode

Description des jeux de données utilisés

Nous utilisons deux types de données pour nos tests :

Afin de calculer nos différents MNT, nous utilisons comme données de base, des courbes de niveau issues de la base de données topographique à grande échelle de l'Institut Géographique National. Ces courbes sont issues d'une restitution stéréoscopique à partir de photographies aériennes. Il s'agit de courbes d'une qualité globale assez bonne. Leur équidistance est de dix mètres. Nous calculons les MNT à partir des points de constructions des courbes de niveaux. Nous obtenons un semis de points *x,y,z* que nous interpolons sur une grille d'une résolution de cinq mètres.

Notre référence altimétrique est un MNT obtenu par un capteur LIDAR de haute précision. Il a été préalablement nettoyé du sursol (forêts, maisons). C'est un semis de points *x,y,z* très dense (plusieurs points par mètres carrés), ré-interpolé sur une grille d'une résolution de cinq mètres. Même si la méthode lisse indéniablement le MNT, la précision altimétrique est bien préservée. Celle-ci est suffisante pour mettre en valeur les phénomènes que nous allons décrire dans la prochaine partie.

Méthodologie

Nous cherchons à mettre en valeur les types d'erreurs qui caractérisent les deux zones que nous avons définies précédemment. Pour cela, nous calculons dans un premier temps, cellule par cellule, les différences altimétriques entre le MNT LIDAR de référence et les différents MNT à tester. Nous obtenons ainsi trois cartes d'erreurs (LID-TIN, LID-RST et LID-IDW).

Nous cherchons ensuite à caractériser le relief de notre zone d'étude. Pour cela, à l'aide d'un expert en géomorphologie, nous délimitons sur le modèle numérique de terrain référence (le LIDAR) différentes zones représentant différents types de relief.

Nous définissons dans l'ordre deux zones caractéristiques homogènes majeures (figure B.9.1, page suivante) et une grande zone de transition, moins homogène :

- les zones de talwegs : elles définissent des zones majoritairement basses et concaves. Il s'agit de zones morphologiques qui représentent l'endroit le plus bas d'une vallée. C'est la zone où l'on retrouve les réseaux hydrographiques ;
- les zones sommitales : elles définissent des zones majoritairement hautes et convexes. Il s'agit de zones hautes, peu érodées. On y retrouve les zones de crête ;

- les zones de versants page suivante: il s'agit des zones intermédiaires. Elles relient les zones sommitales aux zones de talwegs.

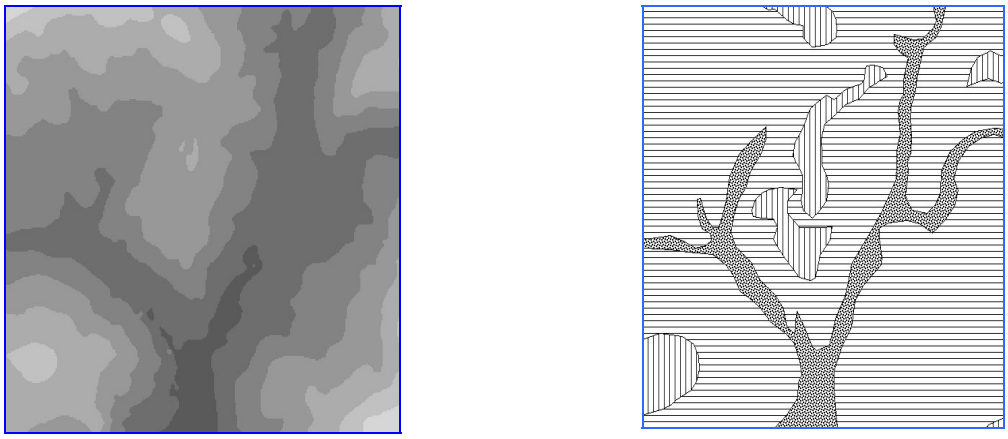


figure B.9.1

À gauche, le MNT, à droite la carte de caractérisation du relief.

À partir des cartes d'erreurs des MNT et à partir de la carte de caractérisation du relief, nous observons dans quel type de terrain se trouvent les erreurs les plus importantes. S'agissant d'une soustraction entre l'altitude du MNT LIDAR de référence et le MNT à tester, les données positives indiquent une erreur de sous-estimation du MNT à tester par rapport à la référence. Les données négatives indiquent une erreur de surestimation du MNT à tester par rapport à la référence.

Nous effectuons deux types de tests. Le premier prend en compte toutes les différences et analyse les zones en fonction de toutes les erreurs comprises à l'intérieur. Le second test ne prend en compte que les erreurs importantes (erreurs supérieures ou inférieures à deux mètres). Notons au préalable que ces trois cartes présentent une erreur moyenne globale assez faible.

L'écart moyen est calculé à l'aide de :

Écart moyen = $\sum (Z_{lidar} - Z_{MNT}) /$ nombre total de points.

Détermination des zones d'erreurs importantes

La comparaison de trois types de modélisation du terrain met en lumière trois points importants :

- la moyenne de toutes les erreurs qui affectent nos différents MNT est globalement similaire. Elle est assez faible et est comprise entre - 0,4 (RST) et - 0,46 (TIN) : les trois MNT sont affectés par une légère sur-estimation qui affecte de manière similaire toutes les zones (sauf les zones de crêtes) ;
- concernant l'étude des erreurs significatives, nous montrons que sur les trois types de MNT, une forte disparité existe entre les zones de crêtes et les zones de talwegs et le reste du MNT. Cette répartition des erreurs est très similaire sur les trois tests que nous avons effectués. On observe, sur les différentes interpolations de MNT, et en mettant l'accent non pas sur la qualité globale, comme l'a fait [CARRARA et al 98], mais sur l'estimation de zones d'erreur majeures, que les différents MNT sont tous à peu près aussi faux dans les même types d'endroit. Les zones de sous-estimation sont les zones sommitales et les zones surestimées sont les zones de talwegs ;
- la modélisation qui permet la meilleure représentation des zones sommitales est l'interpolation RST. Comme l'interpolation RST cherche à obtenir un aspect lissant sur l'ensemble de la surface, les sommets et les zones de talwegs se trouvent être un peu corrigés du manque d'information. Par cette interpolation, ils obtiennent une forme générale assez convexe sur les zones sommitales et concaves sur les zones de talwegs qui pallie, dans une certaine mesure, l'erreur de sous-estimation de ces zones. C'est l'interpolation qui présente le biais le moins important.

Sur les MNT raster, comme sur le MNT TIN, ces biais s'expliquent, d'une part, par le manque d'information altimétrique de ces zones interpolées. Il s'agit très souvent de zones comprises à l'intérieur de la dernière courbe de niveau, maximale ou minimale de la zone. Les interpolations sont donc calculées à partir de nombreuses données similaires. Sur les TIN, il s'agit principalement des zones de triangles plats : les zones sommitales et les zones de talwegs sont affectées un artefact décrit dans [JAAKKOLA et al 98]. Cet artefact est responsable de deux types d'erreurs systématiques (figure B.9.2, page suivante).

Une erreur de sous-estimation, localisée dans les zones de crêtes : la forme plate de ces zones ne représente généralement pas la réalité. Les zones sommitales sont plutôt caractérisées par une convexité générale issue de phénomènes géomorphologiques tels que l'érosion.

On trouve dans les zones de crêtes des formes plus douces et plus arrondies. Comme l'altitude de la zone calculée sur le MNT est celle de la dernière ligne de niveau, l'altitude de cette zone est forcément inférieure sur le MNT par rapport à la réalité terrain.

Une erreur de sur-estimation, localisée dans les zones de talwegs : il s'agit ici du phénomène inverse. La courbe de niveau basse surestime la zone de talweg en nivelant celle-ci à son altitude. Les talwegs, à grande échelle, sont plus généralement creusés par un cours d'eau (qui existe encore ou non). La forme naturelle d'un talweg ne correspond que très rarement à une zone plate comme peut le calculer de manière systématique un algorithme de triangulation classique, comme celle de Delaunay.

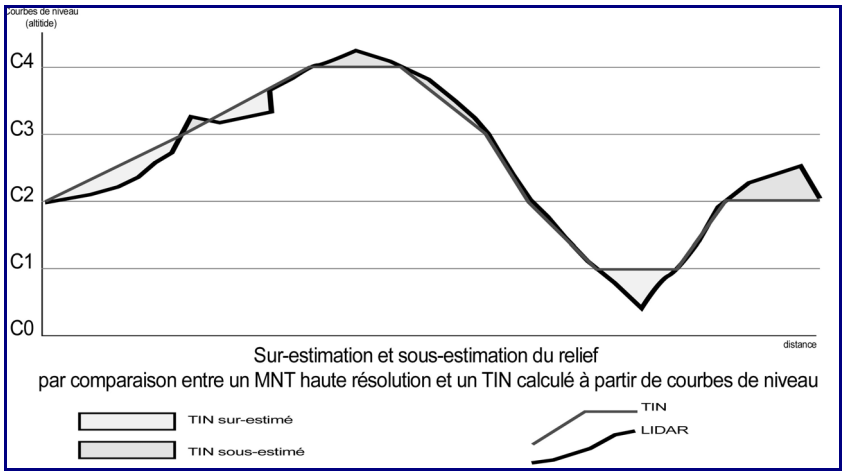


figure B.9.2

Surestimation et sous-estimation du relief. Comparaison entre la réalité terrain et un MNT triangulé.

Sur les modèles numériques de terrain interpolés par la méthode RST ou la méthode IDW, la recherche de l'altitude des points voisins est elle aussi fortement affectée par le manque d'information des zones sommitales et de talwegs.

D'autre part, le manque d'information n'est pas la seule cause de mauvaise estimation de ces zones. En effet, les zones sommitales et les zones de talwegs présentent une hétérogénéité de leurs paramètres morphométriques (direction de pente, en particulier) bien supérieure à une zone de versant qui est généralement plus régulière. C'est pourquoi celles-ci restent toutefois difficiles à représenter de manière précise sur un MNT.

Estimation de l'erreur

Dans cette partie, nous montrons, de manière quantitative, comment les erreurs décrites dans la partie précédente affectent la qualité globale du MNT en termes de précision géométrique, de pente et d'aspect.

Estimation de l'erreur altimétrique

En terme de précision géométrique, on note que la mauvaise estimation des zones sommitales et des zones de talwegs n'influe pas sur la qualité altimétrique globale des MNT calculés. L'impact est plutôt local. Les calculs d'erreur moyenne ne sont pas significativement différents selon que sont exclues ou non les zones sommitales et de talwegs, même si l'erreur moyenne est légèrement moins importante sur les interpolations IDW et TIN. Dans le tableau B.9.1, ci-dessous, les calculs ont été effectués pour les erreurs importantes supérieures à deux mètres.

tableau B.9.1 *: estimation de l'erreur altimétrique moyenne en mètre, par type d'interpolation*

Type d'interpolation	Erreur moyenne sur toute la carte	Erreur moyenne sur toute la carte sans les zones sommitales et de talwegs
Raster RST	- 0,880	- 0,880
Raster IDW	- 0,4552	- 0,0116
Triangulation	- 1,078	- 0,789

Pour conclure sur les erreurs altimétriques liées aux différentes méthodes d'interpolation, comme le soulignent [EKLUNDH et al 95], il semble plus important de bénéficier de bonnes données de départ et d'un algorithme de construction de MNT basique, plutôt que du contraire.

Impact de l'erreur sur les calculs de pentes

Les pentes sont un paramètre du relief important pour de nombreuses simulations. Des exemples sont données dans le domaine du risque et de l'ingénierie par [MANCHE 98] pour les avalanches et par [CHARLEUX 00] pour l'hydrologie. L'impact des erreurs altimétriques se répercute de manière assez importante sur les calculs de pente. Si l'on choisit d'étudier les pentes moyennes des zones sommitales et de talwegs, des biais similaires apparaissent dans nos deux zones morphologiques-test.

tableau B.9.2 *: pentes moyennes en degré, par type d'interpolation et par zones*

	Zones sommitales	Zones de talwegs
RST	12,1583	11,9732
TIN	11,2467	8,0871
IDW	11,4086	9,3897
LIDAR référence	14,0775	13,6871

L'observation de ces résultats montre que les pentes sont systématiquement sous-estimées dans les zones sommitales et de talwegs, et ce, quel que soit le type d'interpolation choisi. La meilleure estimation des pentes provient de la méthode RST. C'est aussi la meilleure méthode au niveau de l'estimation altimétrique de ces zones. La mauvaise estimation des altitudes, et donc des pentes, de ces zones peut être corrigé par l'apport d'une nouvelle information altimétrique. Un exemple de méthode corrective est présenté dans [ROUSSEAUX 03].

Conclusion

Nous montrons, dans cet article, que sur les trois modélisations du relief que nous utilisons, certaines zones sont systématiquement affectées par plusieurs types d'erreurs récurrents, mais la qualité globale du MNT n'est vraiment affectée qu'en termes de pente et d'aspect. Notre application montre toutefois qu'une meilleure prise en compte des artefacts des zones sommitales et de talwegs permet de minimiser l'erreur sur ces deux paramètres, utiles pour des applications. Toutefois, cette prise en compte ne permet qu'une correction partielle de ces zones à cause de la difficulté à interpoler ces formes de manière correcte.

Après la détermination des erreurs par type de relief, l'apport d'une caractérisation automatique du terrain, comme a cherché à le faire [WOOD 98] se montre très intéressante car elle permettrait de définir une carte d'erreur potentielle de manière automatique. Cette carte d'erreur serait calculée en fonction des zones morphométriques détectées. Les premiers tests de caractérisation du relief avec des facteurs morphométriques, telles que la concavité, la convexité ou les pentes [BONIN, ROUSSEAUX 04], montrent toutefois que la multitude de zones détectées nécessitera sûrement des algorithmes permettant de bien gérer les micro-reliefs, grands générateurs de bruits sur les MNT.

Références

[ARNAUD, EMERY 00] M. Arnaud & X. Emery : *Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatiques*, Hermès Éditeur, France, Paris, Science Publications, 2000.

[AUMAN, EBNER 90] G. Auman and H. Ebner : *Generation of high fidelity terrain models from contours*, in Internationals Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 29, part 4, pp. 980 985, 1990.

[BURROUGH, MCDONNELL 98] P. Burrough and R. McDonnell : *Principles of geographical information systems for land resources assessment*, Oxford, Clarendon Press (UofC Call # HD108.15 .B87 1986), 1998.

[CARRARA et al 97] A. Carrara, G. Bitelli and R. Carla : *Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines*, in International Journal of Geographical Information Science 11(5), pp. 451-473, 1997.

[CARTER 92] J. Carter : *The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using grid DEMs*, in Cartographica 29(1), pp. 22-34, 1992.

[CHANG, TSAI 91] K. Chang and B. Tsai : *The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping cartography and Geographic Information Systems,* 18(1), pp. 69-77, 1991.

[CHARLEUX-DEMARGNE 01] J. Charleux-Demargne : *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, soutenue en 2001.

[EKLUNDH, MARTENSSON 95] L. Eklundh and U. Martensson : *Rapid generation of digital elevation models from topographic maps,* in International Journal of Geographical Information Systems, 9, pp. 329-340, 1995.

[HEITZINGER, KAGER 98] D. Heitzinger and H. Kager : *High Quality DTMs from Contourlines by knowledge-based classification of problem regions*, in Proceedings of the International Symposium on "GIS - Between Visions and Applications", ISPRS Comm. 4, Stuttgart, Germany, 1998.

[JAAKKOLA, OKSANEN 00] O. Jaakkola and J. Oksanen : *Interpolation techniques which save terrain morphology : Creating DEMs from contour lines*, in GIM International, 14:9, pp. 46-49, 2000.

[MANCHE 00] Y. Manche : *Analyse spatiale et mise en place de système d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagnes face aux risques naturels*, thèse de doctorat l'Université Joseph-Fourier (Grenoble-1), soutenue en 2000.

[MITASOVA, MITAS 93] H. Mitasova and L. Mitas : *Interpolation by regularized spline with tension : I. Theory and implementation,* in Mathematical Geology 25, pp. 641-655, 1993.

[MOORE et al 91] I.D. Moore and R.B. Grayson : *Digital terrain modelling: a review of hydrological, geo-morphological, and biological applications*, in Hydrological Processes, 5(1): pp. 3-30, 1991.

[POIX, SEFIHA 99] C. Poix & E. Sefiha : *Un outil simple pour la génération de modèles numériques de terrains*, in Cybergéo, n°77, Paris, 1999.

[ROGNANT 00] L. Rognant : *Triangulation Contrainte de Delaunay : Application à la représentation de MNT et à la fusion de MNT radar*, thèse de doctorat de l'Université Joseph-Fourier (Grenoble-1), soutenue le 21 septembre 2000.

[SHEWCHUK 96] J. Shewchuk : *Triangle : Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*, First Workshop on Applied Computational Geometry, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 124-133, ACM, May, 1996.

[WECHSLER 99] S. Wechsler : *Results of the DEM User Survey*, http://web.syr.edu/~srperlit/survey.html, 1999.

[WEIBEL, HELLER 91] R. Weibel and M. Heller : *Digital Terrain Modeling,* in "Geographical Information Systems", pp. 269-97, Ed. by David J. Maguire et al., Longman Group, UK, 1991.

[WISE 00] S. Wise : *Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours*, in Hydrological Processes, 14, pp. 1909-1929, 2000.

[WOOD 96] J. Wood : *The Geo-morphological Characterization of Digital Elevation Models*, Ph. D. Dissertation, Department of Geography, University of Leicester, Leicester, UK, 1996.

[ZHU et al 99] H. Zhu : *Flat feature processes from triangulated irregular networks for hydrological modelling*, in Conference Actes of Geocomputation, Fredericksburg, VA, USA, 1999.

Publications

[BONIN, ROUSSEAUX 04] O. Bonin and F. Rousseaux : *Digital terrain model quality assesment : insights on how to minimize and handle commons artefacts*, in Proceedings of ISSDQ Vienna 2004, laboratoire COGIT, IGN-SR-04-014-S-COM-OB, 2004.

[HOTTIER 90] P. Hottier : *Splines cubiques*, support de cours ENSG-IGN du DEA SIG 90/91, IGN, 1990.

[IGN 1998] *: Spécifications de la BD TOPO*, rapport interne de l'IGN, Saint-Mandé, France, 1988.

[MONIER 97] P. Monier : *Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique. Application à la généralisation de l'orographie,* thèse de doctorat de l'Université Louis-Pasteur, Strasbourg, laboratoire COGIT, IGN-SR-97-001-S-THE-PM, soutenue le 10 juillet 1997.

[ROUSSEAUX 03] F. Rousseaux : *Étude de la représentation du relief sur les application*, in Revue internationale de géomatique, n° 4/2003, Édition Lavoisier, Paris, France, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-050-S-ART-FR, 2003.

B.10 Dérivation de Bases de Données Cartographiques à partir d'une Base de Données Géographiques : application à la dérivation du bâti pour le 1 : 25 000 et le 1 : 50 000 à partir de la BD TOPO

Jenny Trévisan

Introduction

Lorsqu'on souhaite produire une carte à partir d'une Base de Données Géographiques vectorielles (BDG), il est nécessaire de simplifier les données géographiques pour qu'elles soient lisibles à l'échelle de représentation souhaitée. Cette opération de simplification des données géographiques pour la cartographie s'appelle la généralisation cartographique.

Le contenu de la BDG est donc modifié dans le but de réaliser une carte et on aboutit ainsi à une nouvelle Base de Données, dites Cartographiques (BDC) qui correspond aux spécifications cartographiques de cette carte : échelle, contenu, symbolisation, etc.

Nous appelons ici dérivation d'une BDC à partir d'une BDG, la succession d'étapes qui permettent de créer la BDC finalisée en partant de la BDG, à savoir : modélisation de la BDC, filtrage de contenu, symbolisation et généralisation cartographiques des données dans la BDC, figure B.10.1, ci-dessous.

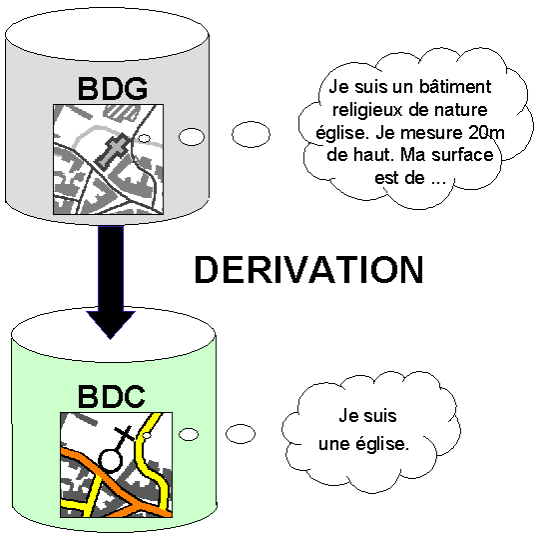


figure B.10.1 *: dérivation d'une BDC à partir d'une BDG*

Contexte et objectifs

Contexte

Si la dérivation d'une Base de Données Cartographiques pour le 1 : 25 000 à partir de la BD TOPO (BDC 25k) a déjà été étudiée et mise en œuvre dans les années 90 par le projet *BD TOPO 25* qui a permis la mise en place de la chaîne de production Type 93, la réalisation d'une BDC 50k à partir de la BD TOPO posait alors problème à cause des opérations conséquentes de généralisation que nécessite cette échelle, en particulier en ce qui concerne le bâti.

Aujourd'hui, les récentes avancées de la recherche en généralisation automatique nous permettent d'aborder sereinement la problématique d'une BDC 50k à partir de la BD TOPO.

Tout d'abord, le Projet européen AGENT *(Projet européen Esprit 24939)*, dont le laboratoire COGIT était leader, a livré en décembre 2000 un prototype de généralisation automatique sur le SIG Lamps2 de la société anglaise Laserscan, également partenaire du projet.

Le Projet Carto 2001, qui s'est terminé en mars 2004, a ensuite travaillé sur le passage en production de plusieurs résultats de recherche. Il s'agissait de créer une BDC au 1 : 100 000 à partir de la BD CARTO, ce qui a permis d'industrialiser la généralisation automatique des réseaux de communications (prototype AGENT et beams [BADER 01]), le placement automatique des toponymes (logiciel *WinPat*) et la propagation automatique des mises à jour dans une BDC.

Enfin, depuis la fin du Projet AGENT, le laboratoire COGIT a continué ses recherches en généralisation, et plus précisément sur la généralisation du bâti.

Objectifs

Nous disposons d'une Base de Données Géographiques de résolution métrique, la BD TOPO, topologiquement structurée, avec des identifiants uniques sur chaque objet. Précisons que la problématique de la dérivation du 1 : 25 000 à partir de la BD TOPO est relativement similaire à celle de la dérivation du 1 : 50 000. En effet, ces deux séries de cartes ont les mêmes spécifications de contenu, à la symbolisation et la généralisation près : leur contenu potentiel est disponible dans la BD TOPO.

Plutôt que d'envisager une production découplée du 1 : 25 000 et du 1 : 50 000, nous cherchons ici à produire une Base de Données Cartographiques Multi-Représentation, ce qui permettra de gérer les deux échelles, que ce soit pour la symbolisation, la généralisation ou la mise à jour.

La problématique de cette étude est donc de dériver à partir de la BD TOPO une Base de Données Cartographiques :

- qui gère la multi-représentation 1 : 25 000 et 1 : 50 000 ;
- qui prend en compte les problématiques de la généralisation automatique ;
- qui favorise les possibilités de mise à jour automatisée.

Dans la suite, nous appellerons cette base de données multi-représentation, la BDC 25k-50k (figure B.10.2).

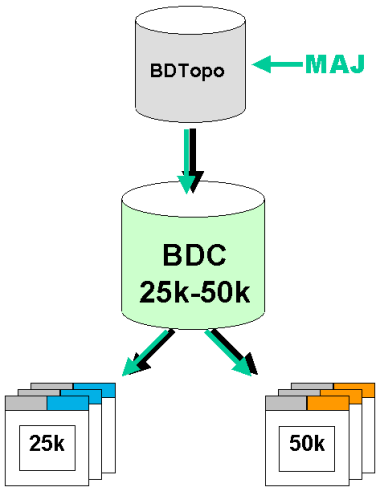


figure B.10.2 *: BDC multi-représentation*

Démarche adoptée

Pour réaliser cette BDC multi-représentation, nous devons répondre aux questions suivantes : quel sera son contenu ? Quelle sera la symbolisation des données ? Comment se fera la généralisation des données ? Et surtout : quelle sera la modélisation de cette base de données ?

Concernant le contenu de la BDC 25k-50k, nous disposons des spécifications de contenu des séries 1 : 25 000 et 1 : 50 000, spécifications qui nous aiderons à filtrer les données BD TOPO pour ne garder que ce qui est nécessaire aux deux cartes. Concernant la symbolisation des données, nous disposons également des légendes des séries 1 : 25 000 et 1 : 50 000, sur lesquelles nous nous baserons.

Les deux problèmes qui restent en suspend concernent la modélisation à adopter pour la BDC et les opérations de généralisation à faire subir aux données, en particulier pour le 1 : 50 000. Ce sont donc les deux points que nous allons aborder dans la suite de cet article. Comme nous l'avons déjà expliqué, c'est la généralisation du bâti qui posera le plus de problème, tous les exemples qui vont suivre concernent donc la dérivation du bâti.

Modélisation de la BDC 25k-50k

Nous proposons ici un schéma de données adapté pour les besoins de la BDC 25k-50k en expliquant au préalable la démarche qui nous a amenés à proposer ce schéma particulier.

Tout au long de ce chapitre, nous allons suivre la dérivation des bâtiments de la BD TOPO : ils sont regroupés au sein d'une même classe surfacique nommée BATIMENT, qu'il s'agisse de bâtiments quelconques, de mairies, d'églises ou encore de silos.

Cette classe porte un certain nombre d'attributs (figure B.10.3, ci-dessous) :

- l'attribut IDENTIFIANT contient une empreinte digitale, identifiant unique en fonction du schéma de livraison ;
- l'attribut SOURCE précise comment on a récupéré le bâtiment ;
- les attributs NATURE et CATÉGORIE assurent la différenciation sémantique des bâtiments. L'attribut CATÉGORIE peut prendre les valeurs : Administratif, Industriel, agricole ou commercial, Religieux, Sportif, Transport et Autre. L'attribut NATURE peut prendre les valeurs : Aérogare, Arc de triomphe, Arène ou théâtre antique, Bâtiment agricole, Bâtiment commercial, Bâtiment industriel, Bâtiment religieux divers, Bâtiment sportif, Chapelle, Château, Église, Fort, Blockhaus, Casemate, Gare, Mairie, Monument, Péage, Préfecture, Serre, Silo, Sous-préfecture, Tour, donjon ou moulin, Tribune et Autre ;
- les attributs HAUTEUR, Z_MAX et Z_MIN renseignent sur la hauteur, la position altimétrique du bâtiment.

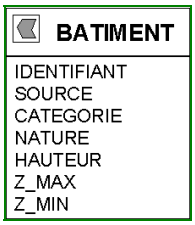


figure B.10.3 *: classe BATIMENT BD TOPO*

Que doit-on modéliser ?

Pour construire la BDC 25k-50k, les possibilités de dérivation sont multiples et dépendent de plusieurs facteurs relativement différents, liés aux manipulations que l'on veut pouvoir réaliser sur la BDC. Nous expliquons ici la démarche qui nous a conduits à proposer le schéma détaillé dans les paragraphes suivants.

… pour la prise en compte des mises à jour

La BDC 25k-50k doit permettre une mise à jour optimisée des données. On part du principe que les mises à jour de la BD TOPO seront livrées sous forme de lots différentiels ou de lots d'évolutions [BADARD 00]. On compte faire le lien entre les mises à jour BD TOPO et les données de la BDC par l'intermédiaire direct de l'identifiant unique stocké dans l'attribut IDENTIFIANT (empreinte digitale).

En conclusion :

⇨ L'attribut IDENTIFIANT doit être conservé pour la mise à jour.

… pour le calcul de la symbolisation

Lorsqu'on analyse les spécifications cartographiques décrites par la légende 1 : 25 000 (la problématique est la même avec la légende 1 : 50 000), on se rend compte que la symbolisation d'un objet peut dépendre de sa composante sémantique, et/ou de sa composante géométrique.

Par exemple, un bâtiment de catégorie « Administratif » et de nature « Mairie » dans la BD TOPO sera représenté au 1 : 25 000 par sa surface comme l'indique la figure B.10.4, page suivante. La correspondance entre l'objet topographique et sa symbolisation cartographique se fait ici par une *analyse* purement *sémantique*.

Pour un bâtiment surfacique catalogué comme une église et de longueur 55 m dans la BD TOPO, la symbolisation 1 : 25 000 dans la BDC sera surfacique comme l'indique la figure B.10.5, page suivante. Si ce même bâtiment surfacique avait pour longueur 30 m, la symbolisation 1 : 25 000 serait alors ponctuelle, c'est-à-dire représentée par le symbole de la figure B.10.6, page suivante.

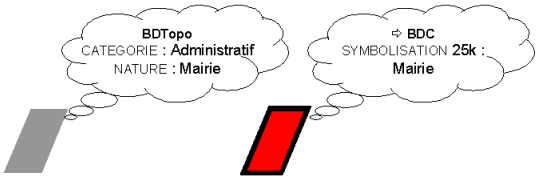


figure B.10.4 *: analyse sémantique pour la symbolisation d'une mairie*

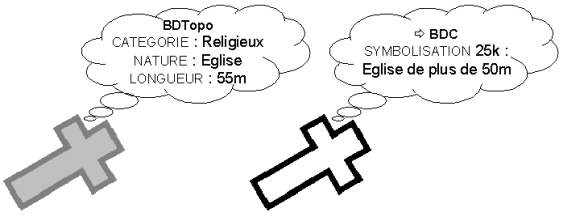


figure B.10.5

Analyse géométrique et sémantique pour la symbolisation d'une église.

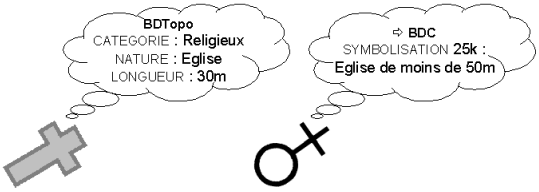


figure B.10.6

Analyse géométrique et sémantique pour la symbolisation d'une église.

Nous voyons ici que dans certains cas, le bâtiment est représenté par sa surface alors que, dans d'autres cas, il peut être ponctualisé. Cet exemple montre que pour une même classe, la symbolisation des objets peut changer en fonction d'une *analyse* autant sémantique que *géométrique*.

Chaque objet de la BD TOPO doit donc passer par le filtre des spécifications cartographiques pour connaître sa symbolisation dans la BDC. Cette information de symbolisation est primordiale pour la BDC : les objets ne sont plus classés par entité géographique, mais par symbolisation.

De plus, si un objet est ponctualisé, c'est-à-dire représenté par un symbole ponctuel, cette mise en symbolisation change la nature géométrique de l'objet : un objet géographique surfacique peut apparaître comme un objet cartographique ponctuel. La géométrie cartographique n'est donc pas la même que la géométrie géographique, même si elle en découle. Ce postulat se confirme lorsqu'on effectue la généralisation, car la géométrie peut être alors déformée ou déplacée (voir paragraphe suivant).

En conclusion :

- si tous les bâtiments BD TOPO doivent être récupérés dans la BDC, tous leurs attributs BD TOPO ne sont pas utiles pour pouvoir les symboliser. Outre la géométrie de référence, nous ne garderons de la BD TOPO que les attributs qui nous permettront de calculer la symbolisation des objets, soit, pour les bâtiments, CATÉGORIE et NATURE ;
- la symbolisation et la géométrie cartographique doivent apparaître dans la BDC.

… pour la multi-représentation

N'oublions pas cependant que nous construisons une BDC multi-représentation : un même objet de la BD TOPO peut ne pas avoir la même symbolisation cartographique, ni la même géométrie cartographique au 1 : 25 000 et au 1 : 50 000 (figure B.10.7).

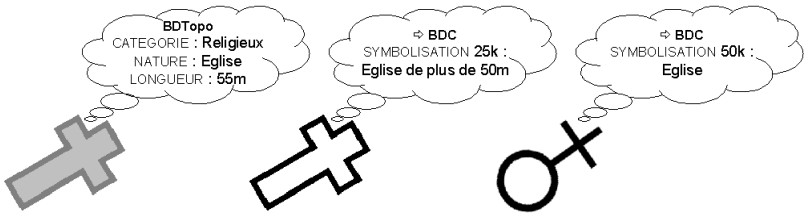


figure B.10.7 *: multi-représentation*

En conclusion :

- les caractéristiques cartographiques du 1 : 25 000 et du 1 : 50 000 ne sont pas forcément les mêmes. La BDC doit pouvoir prendre en compte ces différences de représentation.

… pour la cartographie pure

Certaines opérations de cartographie nécessitent également l'ajout d'attributs cartographiques spécifiques. Si on veut orienter un symbole d'église le long d'une route, il faut pouvoir stocker la valeur de la rotation car celle-ci dépend de la situation et donc de l'objet. Sur la figure B.10.8, le symbole de l'église est orienté à - 82 degrés par rapport à la verticale. On peut stocker cette valeur dans un attribut spécifique « Orientation ».

figure B.10.8 *: orientation d'un symbole*

En conclusion :

- outre la symbolisation et la géométrie cartographique, certains attributs spécifiques à la cartographie doivent apparaître dans la BDC.

… pour la généralisation

Pour passer des données topographiques (échelle équivalente au 1 : 15 000) aux données cartographiques (1 : 25 000 ou 1 : 50 000), on doit suivre certaines règles de généralisation. Ces règles doivent être modélisées pour permettre l'automatisation.

On distingue les opérations de généralisation individuelle (généralisation d'un objet en dehors de son contexte), des opérations de généralisation contextuelle. On ne cite ici que les règles qui vont influencer la modélisation des bâtiments BD TOPO.

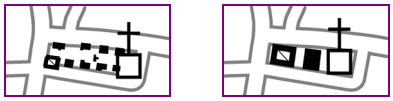


figure B.10.9 *: généralisation d'un îlot urbain pour le 1 : 50 000*

- En généralisation individuelle :

  - les bâtiments symbolisés par une surface doivent subir une généralisation de forme ;
  - les bâtiments ponctualisés n'ont pas besoin de cette généralisation de forme

- En généralisation contextuelle (figure B.10.9) :

  - les bâtiments peuvent changer de place en fonction du contexte (par exemple : pour ne pas être superposés aux symboles des routes) ;
  - les bâtiments peuvent être supprimés s'il n'y a pas assez de place ;
  - les bâtiments à sémantique particulière doivent être préservés.

En conclusion :

- on doit pouvoir distinguer facilement les objets qui doivent subir une généralisation individuelle. Le type de géométrie cartographique d'un bâtiment (surfacique ou ponctuel) doit être facilement récupérable ;
- la BDC doit permettre une manipulation facile des géométries cartographiques ;
- certains objets cartographiques pourront être supprimés ;
- les objets à sémantique particulière doivent être facilement identifiables.

Le schéma de données proposé

En prenant en compte tous les besoins que nous venons d'évoquer, nous proposons ici un schéma de données pour la BDC 25k-50k. Ce schéma a été implémenté dans le SIG Lamps2, qui permet le référencement et l'héritage multiple.

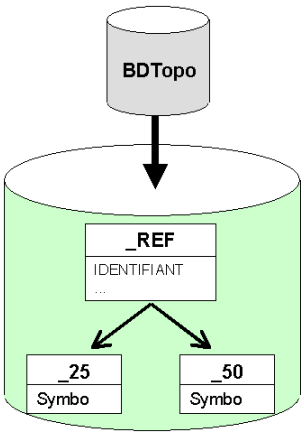


figure B.10.10 *: principe général du schéma multi-représentation, formalisme UML*

Principe général

Le schéma de la BDC 25k-50k s'appuie sur le schéma BD TOPO initial : en premier lieu, on crée des classes dites *de référence* (noms à suffixe_REF) qui sont une copie des classes BD TOPO, filtrées des attributs qui ne sont pas utiles pour la cartographie et la mise à jour.

Chacune de ces classes de référence pointe sur deux classes cartographiques indépendantes, une classe pour le 1 : 25 000 et une classe pour le 1 : 50 000. Ces deux classes, dont les noms ont pour suffixes _25 et _50, contiennent les attributs purement cartographiques, dont la symbolisation.

Par conséquent, un objet de référence pointe (par référence) vers deux objets cartographiques, un objet pour le 1 : 25 000 et un objet pour le 1 : 50 000. Un objet BD TOPO correspond donc à trois objets dans la BDC 25k-50k.

Cas du Bâti

Le schéma des classes cartographiques peut être enrichi en fonction de la classe traitée. Nous proposons ainsi le schéma de la figure B.10.11 (page suivante) pour traiter le bâti.

Pour les bâtiments, la classe BATI_25 se décompose en une classe BATI_25_DIVERS et une classe BATI_25_IMPORTANT. Cette scission de classe permet de mettre en avant les différences essentielles de sémantique entre les bâtiments, nécessaires à la généralisation.

La classe BATI_25_IMPORTANT se décompose elle-même en une classe BATI_25_IMPORTANT_PONC pour les bâtiments ponctualisés et une classe BATI_25_IMPORTANT_SURF pour les bâtiments surfaciques. Cette différenciation permet d'avoir directement accès aux différences de géométrie cartographique.

Il en va de même pour la classe BATI_50.

À tout moment, les objets des classes cartographiques peuvent être détruits sans scrupule car on peut les reconstruire à partir des objets de référence.

Résultats

La création des objets cartographiques à partir des classes de référence a été réalisée et automatisée dans le SIG Lamps2, lors d'une phase dite de précodage, non seulement pour les bâtiments (figure B.10.12, page suivante), mais également pour tous les objets des cartes 1 : 25 000 et 1 : 50 000 (figure B.10.13, page suivante).

La modélisation et la symbolisation des données cartographiques étant ainsi terminées, nous pouvons passer à l'étape suivante : la généralisation des données.

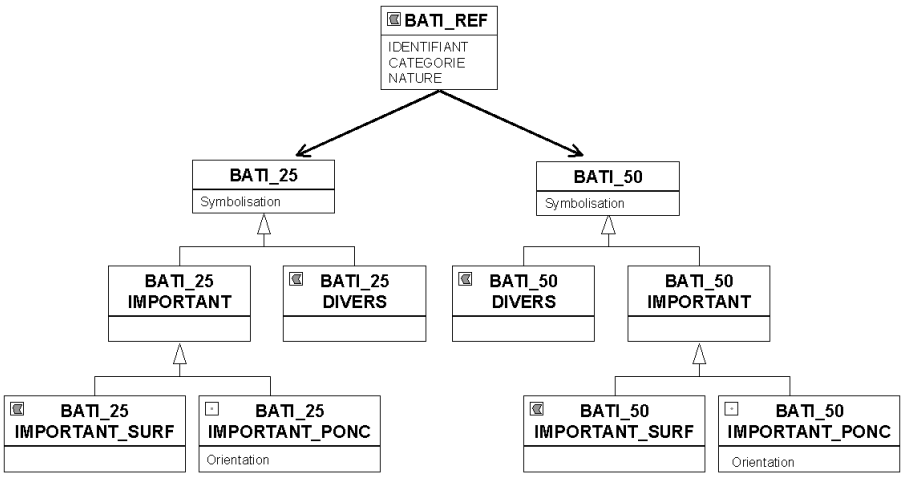


figure B.10.11 *: schéma multi-représentation pour le bâti - formalisme UML*

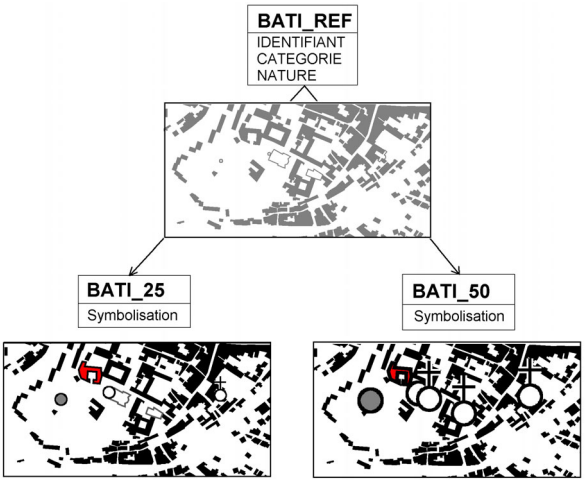


figure B.10.12 *: précodage du bâti*

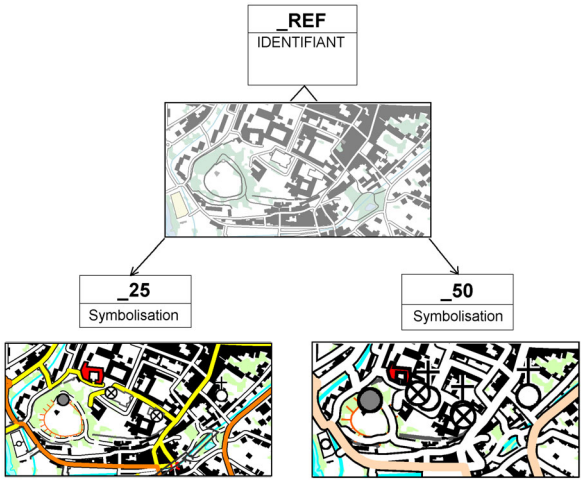


figure B.10.13 *: précodage de toute la BDC 25k-50k*

Généralisation de la BDC 25k-50k

La généralisation des données va pouvoir se faire indépendamment sur les deux niveaux de représentation que sont le 1 : 25 000 et le 1 : 50 000. On utilise pour cela le prototype de généralisation AGENT, voir [DUCHÊNE, RUAS 01], [DUCHÊNE, REGNAULD 02] et [AGENT 04].

Rappel sur le prototype AGENT

La notion d'agent est issue de l'intelligence artificielle [FERBER 95]. Un agent est un objet qui a un but à respecter et qui sait agir de manière autonome pour atteindre ce but. Dans le modèle AGENT [RUAS 99], chaque objet géographique est donc considéré comme un agent. Pour se généraliser, cet agent doit respecter un certain nombre de contraintes de généralisation (buts à atteindre).

Il dispose pour cela de mesures pour s'auto-caractériser. Cette caractérisation lui permet de vérifier si ses contraintes sont respectées, et dans le cas contraire, il peut alors entreprendre des actions pour les améliorer. Le résultat de la généralisation est celui qui maximise le respect de toutes les contraintes.

Dans le prototype AGENT, la généralisation individuelle des objets est conduite par des agents dits *micro*. Un bâtiment surfacique est donc un agent *micro* qui doit gérer sa généralisation de forme. En particulier, il doit vérifier s'il est suffisamment gros pour être lisible à l'échelle de symbolisation (contrainte de taille), si ses petits détails sont lisibles à l'échelle de symbolisation (contrainte de granularité), si ses angles sont droits (contrainte d'équarrissage). Il essaie alors un certain nombre d'algorithmes de généralisation sur sa géométrie d'origine, et garde enfin l'état qui lui convient le mieux.

Voici un exemple pour le 1 : 50 000 :

Bâtiment d'origine — *Après transformation motivée par la contrainte de taille* — *Après transformation motivée par la contrainte de granularité* — *Après transformation motivée par la contrainte d'équarrissage* — *Résultat pour le 1 : 50 000*

La généralisation contextuelle marche sur les mêmes principes, sauf qu'elle est déclenchée par des agents dits *meso* qui décident ce que doivent faire les agents *micro* pour résoudre les conflits. Pour la généralisation contextuelle des bâtiments en zone urbaine, les agents *meso* sont les îlots urbains.

L'îlot doit vérifier qu'il a suffisamment de place pour représenter tous ses bâtiments (contrainte de densité), que ces bâtiments sont individuellement bien généralisés (contrainte dite *micro*), que ses bâtiments ne recouvrent pas les routes et ne sont pas trop proches les uns des autres (contraintes de proximité).

Il ordonne alors à ses bâtiments de faire un certain nombre d'actions en conséquence (déplacements adaptés, suppression, généralisation individuelle) et garde enfin l'état qui lui convient le mieux. Toutes les contraintes ne sont pas nécessairement appliquées, cela dépend de l'échelle finale pour laquelle on effectue la généralisation.

Voici un exemple pour le 1 : 25 000 :

Îlot d'origine — *Après transformation motivée par la contrainte de proximité avec les routes* — *Après transformation motivée par la contrainte micro* — *Après transformation motivée par la contrainte de proximité avec les autres bâtiments* — *Résultat 1 : 25 000*

Réglage des paramètres

Bien entendu, toutes ces contraintes et les actions qui en découlent, sont à paramétrer. Pour chacune d'entre elles, il faut fixer les valeurs de certains paramètres, valeurs qui dépendent de l'échelle pour laquelle on effectue la généralisation.

Dans notre BDC 25k-50k, il a donc fallu régler les paramètres permettant la généralisation du 1 : 25 000 et les paramètres permettant la généralisation du 1 : 50 000. La contrainte de granularité, par exemple, fonctionne avec un paramètre « plus petit côté d'un bâtiment » qui représente la longueur attendue pour le plus petit côté d'un bâtiment à l'échelle de généralisation donnée.

La figure B.10.14 montre l'influence de ce paramètre sur le résultat de la généralisation :

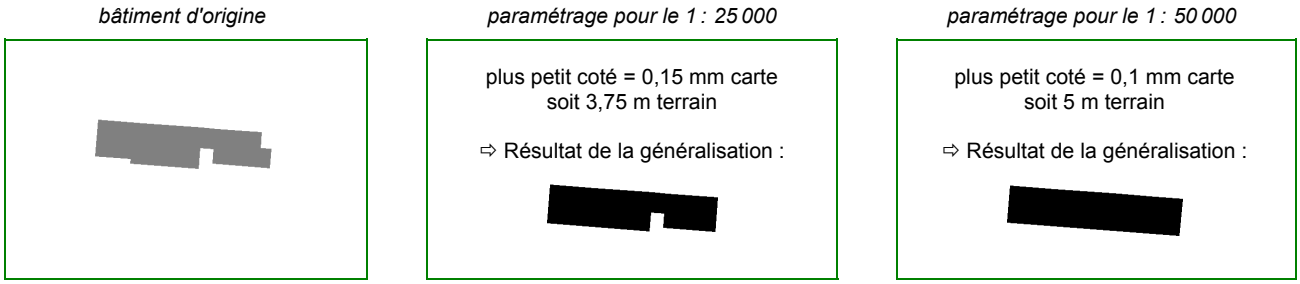


figure B.10.14

Influence du paramètre « plus petit côté d'un bâtiment » sur le résultat de la généralisation.

Nous présentons ci-dessous quelques paramètres adéquats pour les contraintes associées aux bâtiments. Les valeurs de ces paramètres, données en fonction de l'échelle finale, ont été obtenues de façon empirique en faisant un grand nombre de tests pour évaluer leur influence sur le résultat de la généralisation :

Pour la contrainte de taille

paramètre	*valeur 1 : 25 000*	*valeur 1 : 50 000*
taille minimale	0,2 mm² carte	0,25 mm² carte
taille de lisibilité	0,15 mm² carte	0,2 mm² carte
taille moyenne des bâtis de la ville	0,15 mm² carte	0,068 mm² carte
taille maximale d'amplification	0,36 mm² carte	0,36 mm² carte
tolérance acceptée pour la taille	0,0025 mm² carte	0,0025 mm² carte

Pour la contrainte de granularité

paramètre	*valeur 1 : 25 000*	*valeur 1 : 50 000*
plus petit coté d'un bâti	0,15 mm carte	0,1 mm carte
plus petite épaisseur d'un bâti	0,15 mm carte	0,1 mm carte
tolérance acceptée pour l'épaisseur et le coté	0,02 mm carte	0,02 mm carte

Pour la contrainte d'équarrissage

paramètre	*valeur 1 : 25 000*	*valeur 1 : 50 000*
écart à l'angle droit en deçà duquel il faut équarrir	10°	10°
tolérance acceptée pour l'angle droit	0,5°	0,5°

Pour les contraintes de proximité

paramètre	*valeur 1 : 25 000*	*valeur 1 : 50 000*
distance de proximité entre deux bâtis surfaciques de même importance	0,15 mm carte	0,1 mm
distance de proximité entre un bâti important et un bâti quelconque	0 mm carte	0 mm carte
distance de proximité entre deux bâtis ponctuels	0 mm carte	0 mm carte
distance de proximité entre un bâti et une route	0 mm carte	0 mm carte
tolérance acceptée pour la proximité	0,01 mm carte	0,01 mm carte

Améliorations d'AGENT

Outre le réglage précis des paramètres, un certain nombre d'améliorations ont été réalisées sur le prototype AGENT initial.

Prise en compte de la géométrie symbolisée des bâtiments

S'il prend en compte la géométrie symbolisée des routes, le prototype AGENT a au départ été conçu pour traiter des bâtiments surfaciques, en utilisant la géométrie effective du bâtiment (sa surface). Nous avons donc amélioré le prototype pour qu'il puisse traiter des bâtiments ponctuels, c'est-à-dire représentés par des symboles ponctuels, en prenant en compte, non pas la géométrie effective du bâtiment (un point pour un bâtiment ponctuel), mais la géométrie de son symbole (figures B.10.15 et B.10.16, page suivante).

⇨ *Problèmes dans les calculs de proximité pour la généralisation.*

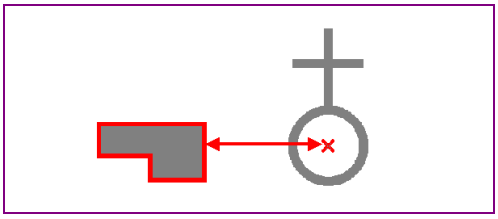


figure B.10.15

Prototype d'origine.
Prise en compte des géométries effectives.

⇨ *Les calculs de proximité pour la généralisation se font entre symboles.*

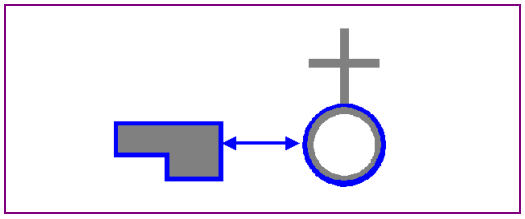


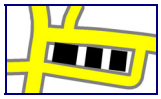
figure B.10.16

Prototype optimisé.
Prise en compte des géométries symbolisées.

Prise en compte de la sémantique des bâtiments

Le prototype AGENT avait prévu la prise en compte de la sémantique des bâtiments, de manière à ce que les bâtiments importants ne soient pas inopinément supprimés lors de la généralisation. Cependant, cette partie n'avait pas encore été implémentée. Nous avons donc ajouté la prise en compte de la sémantique dans les opérations de généralisation (figure B.10.17).

B.10.17a *: îlot à généraliser*



B.10.17b *: généralisation sans tenir compte de la sémantique*

B.10.17c *: généralisation en Tenant compte de la sémantique*

figure B.10.17 *: prise en compte de la sémantique des bâtiments dans la généralisation*

Résultats en cours de la généralisation du bâti

Les figures B.10.18 et figures B.10.19 (ci-dessous et page suivante) donnent quelques résultats de généralisation obtenus sur la BDC 25k-50k avec le prototype AGENT amélioré.

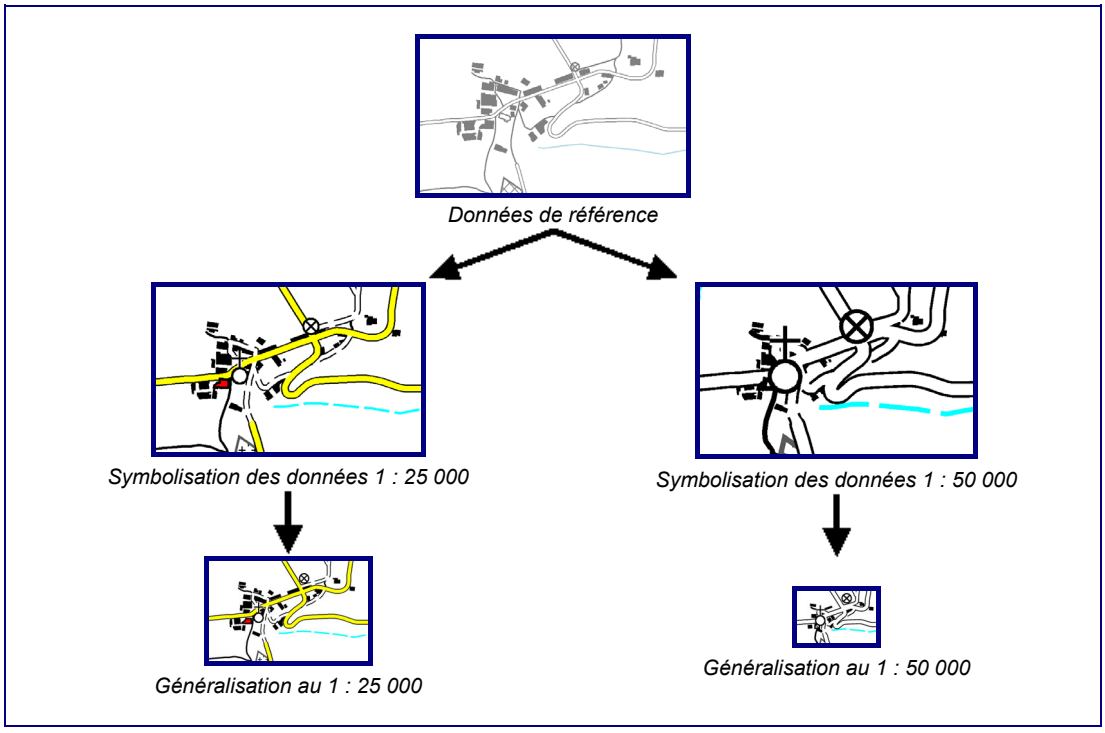


figure B.10.18 *: résultats de la généralisation sur un village*

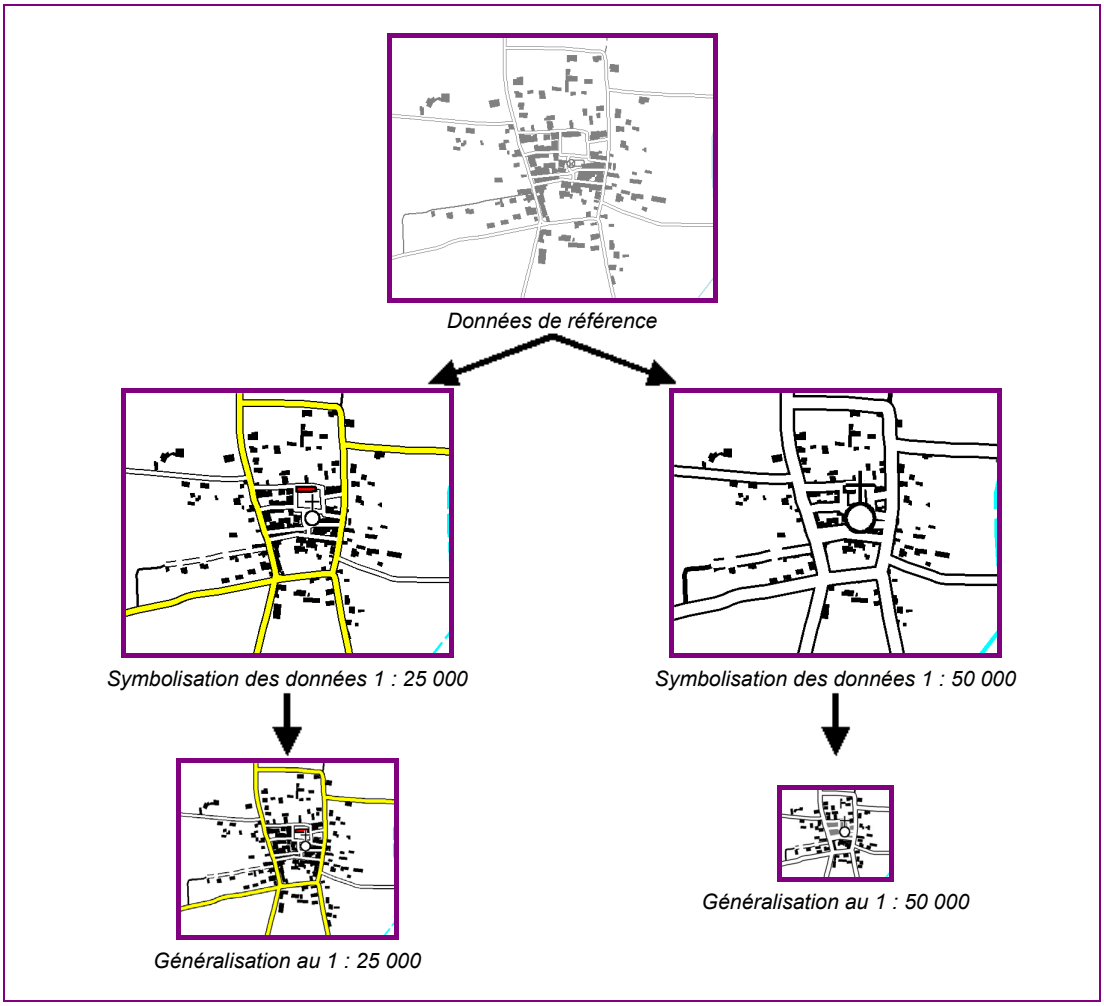


figure B.10.19 *: résultats de la généralisation sur une petite ville*

Améliorations à court terme

Nous venons de voir quelques résultats sur des zones peu urbanisées. Afin de fournir des résultats sur les grandes villes, c'est-à-dire sur les zones très urbanisées, il est nécessaire de prendre en compte les autres travaux concernant la généralisation du bâti qui ont été menés au laboratoire COGIT depuis la fin du projet AGENT. Il s'agit aussi bien de travaux de thèses que de résultats de stages.

Le laboratoire COGIT développe actuellement sur Lamps2 un nouveau prototype de généralisation, basé sur le prototype AGENT, qui regroupera à terme tous les travaux du laboratoire en matière de généralisation. Nous attendons une amélioration nette de la généralisation du bâti grâce à l'introduction de nouveaux types d'objets de niveau *meso* dans la généralisation : les villes et les alignements urbains.

Analyse de la ville

Les travaux de thèse de [BOFFET 01] sur l'analyse de la ville vont nous permettre d'améliorer la généralisation des îlots grâce à la démarche suivante :

- détection automatique des villes (figure B.10.20, page suivante) et donc instanciation d'une nouvelle classe « VILLE » d'objets *meso* ;
- classification des îlots urbains dans chaque ville. On pourra ainsi détecter les îlots centres ville, les îlots zones industrielles, les îlots péri-urbains, etc… (figure B.10.21, page suivante) ;
- déclenchement d'un processus de généralisation adapté à chaque îlot ainsi caractérisé : grisage des centres ville, possibilité d'agrégation de bâtiments dans les zones industrielles, généralisation par défaut sur le péri-urbain, etc.

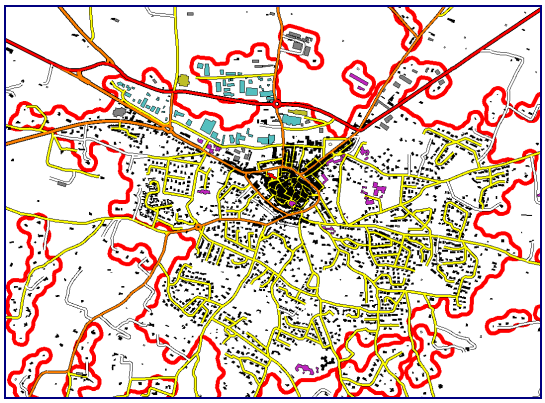


figure B.10.20

Détection des villes.

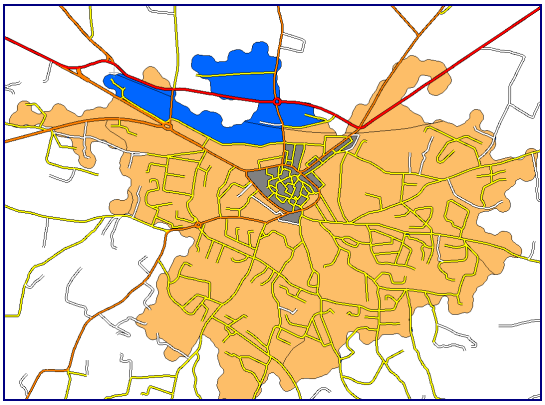


figure B.10.21

Classification des îlots urbains.
En gris, le centre ville.
En bleu, les zones industrielles, en orange le péri-urbain.

Généralisation des alignements

La prise en compte des alignements urbains va également être intégrée dans le nouveau prototype. Trois étapes sont prévues :

- détection des alignements dans un îlot urbain [CHRISTOPHE 01] par projection des centroïdes des bâtiments sur un ensemble de droites prédéterminées (figure B.10.22) : on instancie alors une nouvelle classe « ALIGNEMENT » d'objets *meso* ;

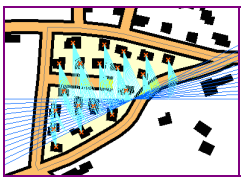


figure B.10.22

Détection des alignements.

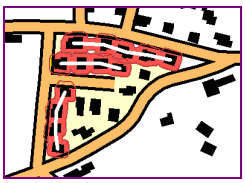
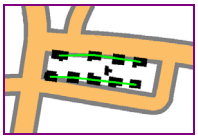


figure B.10.23

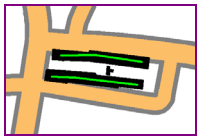
Caractérisation des bons alignements.

- caractérisation des alignements pour ne garder que ceux qui sont très réguliers [RUAS, HOLZAPFEL 04] au sens visuel du terme, en prenant en compte plusieurs critères comme la régularité d'espacement des bâtiments dans l'alignement, la régularité de forme des bâtiments, etc… (figures B.10.23 et B.10.24a) ;



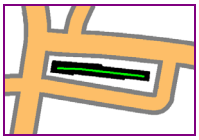
B.10.24a

Situation initiale.



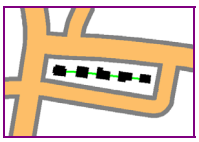
B.10.24b

Prise en compte d'un alignement comme une entité à part entière dans la généralisation.



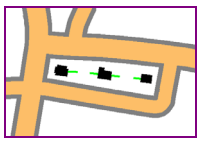
B.10.24c

généralisation contextuelle usuelle avec les contraintes AGENT existantes (l'alignement est assimilé à un gros bâtiment).



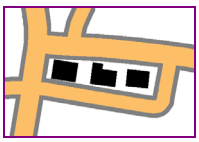
B.10.24d

Déclenchement de la généralisation interne de l'alignement, à nouveau considéré comme une ensemble de bâtiments



B.10.24e

Contrainte de densité dans l'alignement



B.10.24f

Contrainte de généralisation micro avec recentrage

figures B.10.24 *: processus possible de généralisation d'un alignement*

- déclenchement d'un processus de généralisation adapté pour les alignements. Une proposition de processus est expliquée par les figures B.10.24 (page suivante) :

Conclusion

Nous avons proposé une modélisation adaptée à la dérivation d'une Base de Données Cartographiques multi-représentation 1 : 25 000 et 1 : 50 000 à partir de la BD TOPO. Le schéma de données proposé, basé sur le schéma BD TOPO d'origine, a l'avantage de rendre indépendant chaque niveau de représentation cartographique : les objets 1 : 25 000 vivent leur vie cartographique indépendamment des objets 1 : 50 000, mais chacun d'eux sait en permanence quel était son état initial avant cartographie, grâce à un lien avec un niveau dit de référence qui stocke l'état BD TOPO. Ce schéma est compatible avec la propagation des mises à jour.

Une fois ce schéma multi-représentation implémenté sur le SIG Lamps2, nous nous sommes concentrés sur la généralisation du bâti en vue du 1 : 25 000, et surtout du 1 : 50 000, C'est le prototype AGENT qui sert de base à la généralisation. Un réglage des paramètres pour la généralisation ainsi qu'une amélioration d'AGENT pour la prise en compte de la sémantique et de la géométrie symbolisée des bâtiments nous permettent de donner quelques premiers résultats.

La base de données multi-représentation va également bénéficier des derniers travaux du laboratoire COGIT en matière de généralisation du bâti. Ces travaux sont actuellement en cours de finalisation et d'intégration dans un nouveau prototype de généralisation basé sur AGENT : il s'agit d'introduire deux nouveaux niveaux hiérarchiques, les villes et les alignements urbains, afin de permettre un déclenchement mieux adapté de la généralisation des espaces urbains. Pour la généralisation des espaces ruraux, l'approche hiérarchique d'AGENT est souvent inadaptée, aussi espérons-nous, à terme, adjoindre à ce prototype les travaux de [DUCHÊNE 03] concernant la communication entre agents.

Références

[AGENT 04] Projet AGENT : *Computers, Environment and Urban Systems,* numéro spécial sur le projet AGENT, laboratoire COGIT, IGN-SR-04-006-S-RAP, à paraître en 2005.

[BADER 01] M. Bader : *Energy Minimization Methods for Feature Displacement in Map Generalisation,* thèse de doctorat de l'Université de Zürich, Suisse, 2001.

[FERBER 95] J. Ferber : *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective,* in Collection Information Intelligence Artificielle, Éditions InterEditions, France, ISBN 2-7296-0665-3, 1995.

Publications

[BADARD 00] Th. Badard : *Propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques multi-représentations par analyse des changements géographiques,* thèse de doctorat en Sciences de l'Information Géographique de l'Université de Marne-la-Vallée, disponible sur le site ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/, laboratoire COGIT, IGN-SR-00-026-S-THE-TB, 2000.

[BOFFET 01] A. Boffet : *Méthode de création d'informations multi-niveaux pour la généralisation cartographique de l'urbain,* thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, disponible sur le site ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-014-S-THE-AB, 2001.

[CHRISTOPHE 01] S. Christophe : *Implémentation d'un outil de détection et de caractérisation des alignements sous le SIG Lamps2,* ENSAR, rapport de stage, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-021-S-STA-SC, 2001.

[DUCHÊNE 02] C. Duchêne : *Coordination multi-agents pour la généralisation automatique,* in Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN, Bilan de la recherche 2002, pp. 87-95, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-055-S-ART-CD, 2003.

[DUCHÊNE, REGNAULD 02] C. Duchêne & N. Regnauld : *Le modèle AGENT, généralisation et représentation multiple*, direction : Anne Ruas, Hermès, France, chap. 21, p. 369-385, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-035-S-CHA-CD 2002.

[DUCHÊNE, RUAS 01] C. Duchêne & A. Ruas : *Généralisation des données cartographiques : présentation des résultats du projet AGENT,* in Bulletin d'information de l'IGN, n°72 : Bilan de la recherche 2000, pp. 103-114, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-048-S-ART-CD, 2001.

[HOLZAPFEL 02] F. Holzapfel : *Détection et caractérisation des alignements,* Université Paris-6, rapport de stage, laboratoire COGIT, IGN-SR-02-015-S-STA-FH, 2003.

[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, disponible sur le site ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/, laboratoire COGIT, IGN-SR-99-009-S-THE-AR, 1999.

[RUAS, HOLZAPFEL 04] A. Ruas & F. Holzapfel : *Utilisation de connaissance d'experts pour l'automatisation de la caractérisation des alignements de bâtiments*, in Le Monde des Cartes n°179, 21ème Conférence cartographique internationale, Durban, pp. 27-37, laboratoire COGIT, IGN-SR-04-004-S-ART-AR, 2004.

B.11 Représentation du champ de pesanteur sur des repères d'ondelettes sphériques

Isabelle Panet[1,2], Olivier Jamet[1] & Michel Diament[2]

1 : IGN/SR/LAREG, Marne-la-Vallée
2 : Laboratoire de Gravimétrie et Géodynamique, Institut de Physique du Globe de Paris

Introduction

La connaissance du champ de pesanteur est d'un grand intérêt en géodésie, puisque les référentiels d'altitudes sont établis par rapport à une équipotentielle de ce champ, le géoïde. En particulier, les mesures de hauteurs ellipsoïdales effectuées par GPS peuvent être converties en mesures d'altitudes si la hauteur du géoïde par rapport à l'ellipsoïde est connue. Les calculs de géoïdes se font souvent par la méthode de Stokes qui consiste à intégrer sur toute la sphère les anomalies gravimétriques : en pratique, les données disponibles sont lacunaires et de caractéristiques spectrales variées.

On utilise, d'une part, un modèle de champ global à grande longueur d'onde développé en harmoniques sphériques et d'autre part, un ensemble de données locales reflétant tout le spectre dans la zone d'intérêt. Au cours du calcul, les trois gammes de longueurs d'ondes (grandes, moyennes et petites) sont traitées séparément. Les grandes longueurs d'ondes, données par le modèle global, sont notamment soustraites des données locales afin d'isoler leurs composantes aux plus hautes fréquences.

Les données locales ne peuvent être prises en compte dans le développement en harmoniques sphériques : le calcul des coefficients d'harmoniques sphériques nécessite une répartition homogène des mesures sur toute la sphère du fait du caractère délocalisé de ces fonctions. De plus, le nombre de coefficients devient rapidement prohibitif à courte longueur d'onde : plusieurs centaines de millions de fonctions sont nécessaires pour couvrir le spectre entre 1 et 4 000 km. Ainsi, l'opération de retrait de ces données du modèle de champ calculé de manière totalement indépendante ne présente aucune garantie de cohérence.

Pour remédier à ces inconvénients, nous nous tournons vers d'autres types de représentations fonctionnelles du champ de pesanteur, et en particulier les familles d'ondelettes sphériques. Les ondelettes sphériques font l'objet d'études depuis plusieurs années, voir [FREEDEN 98] et [HOLSCHNEIDER 03]. En particulier, les ondelettes harmoniques développées en série de polynômes de Legendre semblent très appropriées pour représenter un champ harmonique tel que le champ de gravité.

Elles offrent une bonne localisation à la fois en espace et en fréquence, au contraire des harmoniques sphériques qui ne sont localisées qu'en fréquence. Ainsi, elles devraient mieux s'adapter à des données dispersées et permettre de manipuler simultanément, dans un cadre cohérent, une représentation globale basse fréquence et une densification locale haute fréquence.

Nous présenterons d'abord le principe de construction d'une famille d'ondelettes sur la sphère, puis comment calculer les coefficients du développement en ondelettes du champ de pesanteur à partir d'un jeu de données. Enfin, nous évaluerons la capacité d'une famille d'ondelettes à représenter un champ harmonique à partir d'inversions sur des jeux de données synthétiques.

Constitution d'un repère d'ondelettes sphériques

Principe de construction d'un repère d'ondelettes

La construction d'une famille d'ondelettes repose sur la discrétisation d'une transformée en ondelettes continue. Une ondelette axisymétrique est caractérisée par un paramètre d'échelle associé à son étalement spectral et un centre autour duquel elle présente une symétrie de révolution. Il s'agit donc de discrétiser les échelles et les positions de manière à couvrir tout le spectre et, pour chaque échelle, toute la sphère. La famille ainsi créée est apte à représenter tout vecteur de l'espace de Hilbert H des fonctions harmoniques à l'extérieur d'une sphère si elle forme un repère de H. La notion de repère élargit en fait celle de base : une base est un cas particulier de repère pour lequel les fonctions sont toutes indépendantes entre elles.

Plus généralement, un repère de H est une famille de fonctions qui génère l'espace H et en fournit une représentation stable. Ainsi, $\{\psi_i\}_{i\in\Gamma}$ est un repère de H si :

$$\forall f \in H, \quad A\|f\|^2 \leq \sum_{i\in\Gamma} \left|\langle f, \psi_i \rangle\right|^2 \leq B\|f\|^2$$

avec : $0 < A \leq B < \infty$.

Les réels A et B forment les bornes du repère. Lorsqu'ils sont égaux, le repère est aussi sensible dans toutes les directions de H (cas de repère étroit). Dans le cas contraire, ces bornes reflètent les sensibilités extrémales du repère, liées à la redondance et à la normalisation de la famille de fonctions. À chaque échelle est associé un ensemble de positions qui forme un échantillonnage de la sphère aussi régulier que possible : la famille d'ondelettes est formée des ondelettes aux différentes échelles placées sur leurs centres d'échantillonnages respectifs. Lorsque l'échelle diminue, le nombre de points d'échantillonnage augmente, reflétant le fait que les ondelettes doivent générer des espaces harmoniques de dimension croissante.

Lorsque le spectre des ondelettes est à support borné, il est possible de définir des systèmes de points pour lesquels les différentes échelles sont génératrices de leur bande de spectre : ce sont les systèmes fondamentaux. Néanmoins, il n'existe pas à notre connaissance de construction récursive de tels systèmes aboutissant à la création de familles génératrices en dimension infinie. On peut montrer que le rang d'une famille d'ondelettes est le même que celui d'une matrice dont les vecteurs colonnes correspondent aux valeurs des harmoniques sphériques pondérées par le spectre des ondelettes aux points d'échantillonnage de la sphère : ceci permet uniquement de vérifier qu'une sous-famille donnée d'ondelettes est génératrice en dimension finie.

Choix de l'ondelette-mère

La littérature propose différents types d'ondelettes sphériques harmoniques, plus ou moins bien localisées en espace et en fréquence. Nous présentons ici des représentations basées sur l'ondelette de De La Vallé Poussin décrite dans [FREEDEN 98] qui présente un bon compromis entre localisation spatiale et fréquentielle. De plus, son spectre est à support borné, ce qui permet de tester numériquement si les premières échelles de la famille sont bien génératrices de leur bande spectrale. La figure B.11.1 illustre les caractéristiques spatiales et spectrales de ce type de fonction.

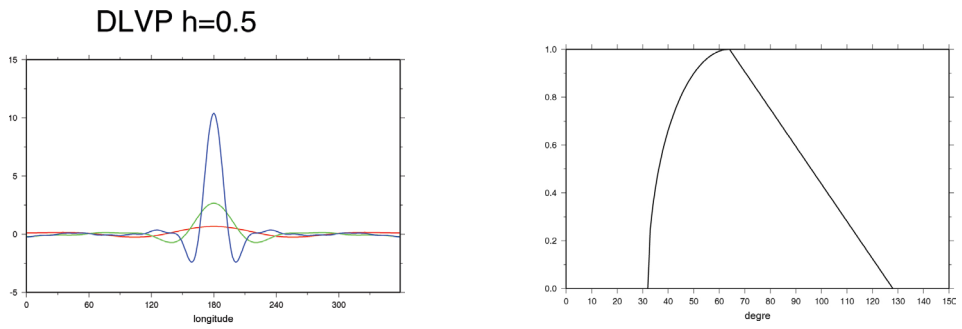


figure B.11.1

Ondelette De La Vallé Poussin : coupe pour les échelles = 1; 0,5 et 0,25 (gauche), spectre pour l'échelle = 0,015625 (droite). Les ondelettes ne sont pas normalisées.

Discrétisation des positions

Nous optons pour un échantillonnage simple de la sphère, basé sur les subdivisions successives des faces d'un polyèdre régulier centré sur la sphère : l'icosaèdre. Nous pouvons ainsi calculer des maillages de plus en plus denses présentant une grande régularité. Ce mode de construction est aussi simple que rapide, c'est pourquoi nous le préférons à l'étude des systèmes fondamentaux qui implique des calculs plus lourds.

L'icosaèdre est un polyèdre régulier à vingt faces triangulaires équilatérales et douze sommets. Pour créer des échantillonnages plus denses, nous subdivisons chaque face en quatre triangles suivant la figure B.11.2. Le maillage de la sphère est alors formé des intersections avec la sphère des directions définies par les sommets de l'icosaèdre subdivisé.

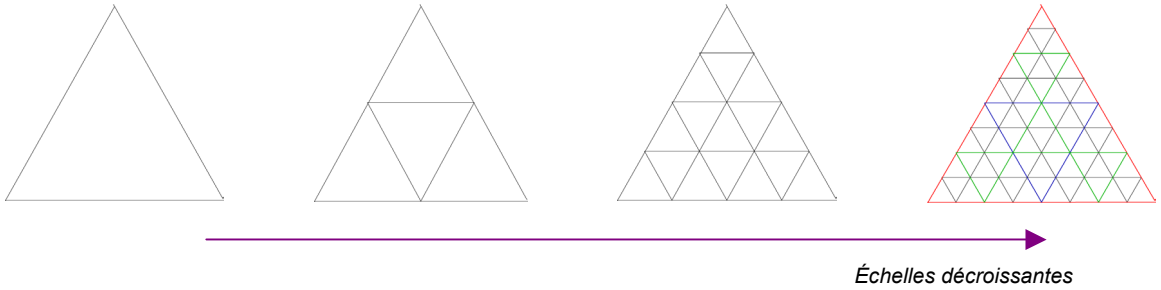


figure B.11.2 *: subdivisions successives d'une face d'icosaèdre*

Discrétisation des échelles

Sur chacun des maillages ainsi créés sont déplacées des ondelettes d'échelles déterminées en fonction du nombre de points du maillage de manière à ce que la famille formée soit génératrice des harmoniques sphériques. En dimension finie, si l'on ignore les liens entre ondelettes de même échelle et si l'on suppose qu'il n'y a aucun recouvrement spectral entre deux échelles consécutives, le nombre d'ondelettes d'une échelle donnée, égal au nombre de sommets du maillage de la sphère correspondant, doit être au moins égal au nombre d'harmoniques sphériques générant la bande spectrale caractérisant cette échelle pour que la famille puisse être génératrice.

En réalité, les ondelettes d'une même échelle sont liées : le nombre de fonctions indépendantes est inférieur au nombre de points du maillage et l'ajustement décrit précédemment ne garantit pas que l'on puisse générer toutes les harmoniques sphériques intersectées par la bande de spectre. Il faut alors modifier le paramètre d'échelle de manière à décaler la bande spectrale vers les basses fréquences, décrites par un plus petit nombre d'harmoniques sphériques.

Cette modification n'est en général pas nécessaire car la plupart des familles d'ondelettes présentent des recouvrements spectraux entre les échelles, qui compensent le défaut précédent. En pratique, nous comparons le nombre d'harmoniques sphériques aux différents degrés avec le nombre d'ondelettes présentant une composante sur ces degrés : ce dernier doit être un peu plus élevé et caractérise la redondance de la famille d'ondelettes. La figure B.11.3 présente ce graphe de redondance pour une famille d'ondelettes de type De La Vallé Poussin.

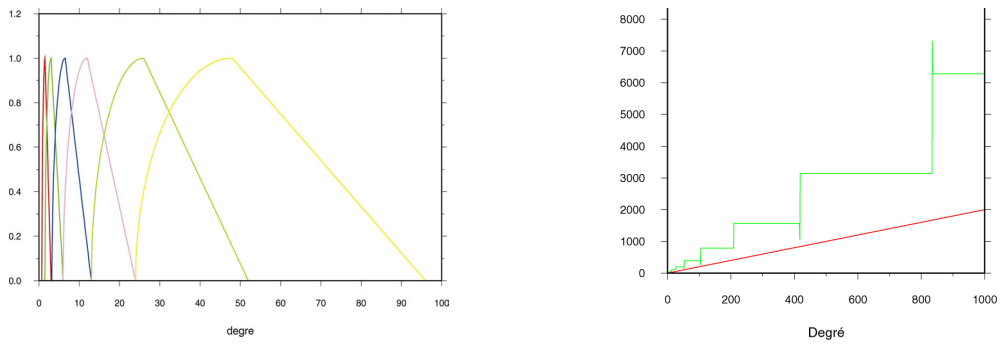


figure B.11.3

Discrétisation des échelles pour les ondelettes De La Vallé Poussin.
Couverture spectrale (gauche) et comparaison du nombre d'ondelettes
par degré (vert) au nombre d'harmoniques sphériques par degré (rouge, à droite).

Les « raccords » entre échelles ne sont pas toujours parfaits, comme l'illustre le graphe de redondance : ceci n'est toutefois pas gênant pour la représentation du champ de pesanteur du moment que la redondance reste supérieure ou égale à celle des harmoniques sphériques. Nous avons également calculé le nombre de fonctions indépendantes pour les six premières échelles de la famille (Cf. paragraphe « *Constitution d'un repère d'ondelettes sphériques* », page 115) : les ondelettes sont bien génératrices de leur bande spectrale.

Le problème inverse

Le problème inverse gaussien

Une fois la famille d'ondelettes construite, il s'agit de calculer une décomposition du champ comme combinaison linéaire d'ondelettes à partir des données. Comme les ondelettes ne sont pas indépendantes, les coefficients de cette décomposition sont liés et l'inversion nécessite une régularisation.

Si l'on suppose que le vecteur x des coefficients à déterminer forme une variable aléatoire gaussienne, la probabilité *a priori* associée à un vecteur particulier est de la forme :

$$\mu_1(x) \propto e^{-\left({}^t x \cdot K^{-1} \cdot x\right)}$$

où K^{-1} est l'inverse de la matrice de covariance des coefficients. Notant b le vecteur des mesures et A la matrice reliant les coefficients aux valeurs du champ, la probabilité sur les mesures est de la forme :

$$\mu_2(b) \propto e^{-\left({}^t(Ax-b) \cdot W^{-1} \cdot (Ax-b)\right)}$$

où W^{-1} est l'inverse de la matrice de covariance du bruit entachant les mesures.

L'information a *priori* sur x est obtenue indépendamment des mesures, donc la probabilité associée à un vecteur de coefficients compte tenu des mesures est égale au produit des probabilités μ_1 et μ_2 et le vecteur qui la maximise est solution du système normal suivant :

$$({}^tA \cdot W^{-1} \cdot A + K^{-1})\, x = {}^tA \cdot W^{-1} \cdot b.$$

Ce système est celui d'une résolution par moindres carrés régularisée par la covariance K : on détermine ainsi le vecteur x qui produit le meilleur ajustement possible aux données (premier terme de la somme) sachant qu'on impose une certaine régularité à la solution, exprimée par la matrice K qui contient l'information physique *a priori* sur le champ. Il est donc extrêmement important de bien évaluer cette matrice.

Calcul de la matrice régularisante

Le vecteur des coefficients n'est malheureusement pas un vecteur gaussien, puisque ses éléments ne sont pas indépendants. Toutefois, la matrice de covariance K peut s'écrire comme la limite d'une suite de matrices de covariances inversibles et d'après [CRAMER 46], la distribution de probabilité associée est la limite des distributions gaussiennes associées à la suite de matrices. Nous choisissons donc d'approximer K par un élément de cette suite qui lui soit aussi proche que possible, en amplifiant légèrement sa diagonale, et de travailler sur la probabilité gaussienne associée.

Notons g le champ de pesanteur et $\{\psi_i\}_{i\in\Gamma}$ la famille d'ondelettes.

La décomposition du champ sur cette famille s'écrit : $g = \sum_{i\in\Gamma} x_i \psi_i$ où les coefficients sont donnés par :

$$x_i = \langle g, \widetilde{\psi}_i \rangle$$

avec $\widetilde{\psi}_i$ l'ondelette duale de ψ_i.

Les fonctions duales sont égales aux fonctions de base dans le cas particulier d'une base orthonormée. Notons $K(r, r_1)$ la fonction de covariance du champ entre les points r et r_1. En première approximation, nous appliquons une hypothèse de stationnarité, c'est-à-dire que nous supposons que $K(r, r_1)$ ne dépend que de la distance sphérique entre les deux points r et r_1 de la sphère unité : on peut alors développer cette fonction en série de Legendre d'après [MORITZ 89] :

$$K(r, r_1) = \sum_l c_l P_l(r \cdot r_1)$$

où les coefficients c_l correspondent au spectre en puissance du champ. Notons $K_{r,\, r1}$ l'opérateur qui associe à toute fonction de carré intégrable sur la sphère son produit scalaire en r avec $K(r, r_1)$. La covariance entre les coefficients i et j s'écrit alors, par linéarité :

$$K_{ij} = \langle K_{r,r_1} \widetilde{\psi}_i(r), \widetilde{\psi}_j(r) \rangle.$$

Il s'agit du produit scalaire entre les ondelettes duales associé à la forme quadratique définie positive $K(r, r_1)$.

Le calcul des ondelettes duales est toutefois très lourd d'un point de vue numérique. Si l'on note U l'opérateur défini par :

$$\forall i \in \Gamma,\ Uf[i] = \langle f, \psi_i \rangle,$$

et U^* son adjoint, le repère dual est défini par [MALLAT 00] :

$$\forall i \in \Gamma,\ \widetilde{\psi}_i = (U^* U)^{-1} \psi_i.$$

Cette relation peut se transcrire sur les coefficients d'harmoniques sphériques définissant les ondelettes et leur duales : on doit alors résoudre un système de très grande taille menant aux coefficients d'harmoniques sphériques des ondelettes duales en fonction de ceux des ondelettes. Toutefois, l'examen de la matrice à inverser montre que sa diagonale domine très largement sur les autres termes et, que les termes diagonaux sont relativement proches : on peut donc approximer le repère dual par le repère lui-même, à un facteur de proportionnalité près.

Ce cas correspond en fait à celui du repère étroit, pour lequel les bornes A et B sont égales : la famille d'ondelettes présente la même sensibilité dans toutes les directions de H, égale à la borne du repère, qui correspond à l'énergie du repère entier dans toute direction de l'espace. On peut comprendre intuitivement pourquoi cette approximation s'applique sur les familles que nous avons construites : d'une part, l'échantillonnage de la sphère est très régulier et ne privilégie aucune direction, d'autre part, la couverture spectrale est elle aussi assez régulière.

Résultats sur des tests synthétiques

Nous avons testé la capacité d'un repère d'ondelettes de De La Vallé Poussin à représenter un champ harmonique globalement et plus localement, à partir de données réparties régulièrement ou irrégulièrement. Les échelles choisies correspondent à la couverture spectrale de la figure B.11.3 : 0,667 500 ; 0,333 500 ; 0,154 500 ; 0,076 940 ; 0,038 480 ; 0,019 240 ; 0,009 580 ; 0,004 800 et 0,002 393 pour les niveaux 1 à 9 respectivement.

Représentations globales

Les données synthétiques utilisées sont des échantillons des anomalies de pesanteur tirées du modèle de champ EGM96, tronqué de manière à ne prendre en compte que les degrés 2 à 12, avec une atténuation gaussienne des coefficients. Ces données sont parfaites, ce que l'on traduit numériquement en leur assignant un bruit arbitraire de 10^5 mGals (avec une matrice de covariance diagonale). L'échantillonnage régulier est constitué de 1 106 données espacées de 7,5° en latitude et longitude, alors que l'échantillonnage irrégulier comprend 100 données réparties suivant les points noirs de la figure B.11.4a (ci-dessous). Nous représentons le champ sur les trois ou quatre premières échelles du repère (216 ou 858 ondelettes). Le modèle en ondelettes est filtré de la même manière que les données synthétiques.

La figure B.11.5 (page suivante) présente la reconstruction du champ sur les ondelettes à partir des données régulièrement réparties, l'écart entre cette reconstruction et le champ théorique ainsi que les résidus aux mesures. La reconstruction est très bonne. Sa précision correspond au bruit supposé et les résidus par rapport au modèle ne présentent aucune structure particulière. Une inversion des mêmes données sur la base des harmoniques sphériques produit un résultat très similaire : les performances des ondelettes sont aussi bonnes que celles des harmoniques sphériques en global.

La figure B.11.6 (page suivante) présente la reconstruction du champ sur les ondelettes à partir des données irréguliè-rement réparties, l'écart entre cette reconstruction et le champ théorique ainsi que les résidus aux mesures. Les résidus de mesures sont très faibles, et reflètent la qualité de l'inversion.

La reconstruction est assez fidèle au modèle au voisinage des données et ne crée pas d'oscillations parasites dans les zones lacunaires. Une inversion des mêmes données sur la base des harmoniques sphériques produit un très mauvais résultat, avec des oscillations de très grande amplitude dans les zones lacunaires : les performances des ondelettes sont bien meilleures.

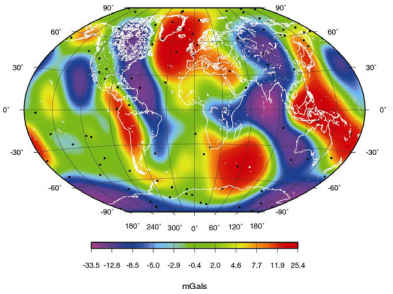


figure B.11.4a
Modèle EGM96, degrés 2 à 12.

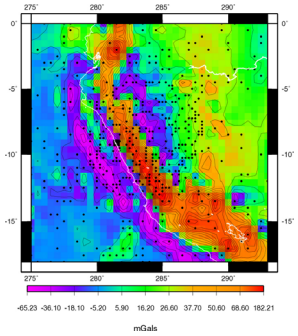


figure B.11.4b
Modèle EGM96, degrés 2 à 360.

Représentations locales

Les données synthétiques utilisées sont des échantillons des anomalies de pesanteur tirées du modèle de champ EGM 96, tronqué cette fois de manière à ne prendre en compte que les degrés 2 à 360, avec le même bruit synthétique. L'échantillonnage régulier est constitué de 1 369 données espacées de 0,5° en latitude et longitude, couvrant une zone de 20° par 20°, alors que l'échantillonnage irrégulier comprend 500 données réparties suivant les points noirs de la figure B.11.4b (ci-dessus). Nous représentons le champ sur les échelles 3 à 9 du repère (6 790 ondelettes) à partir des données régulièrement réparties et sur les échelles 3 à 8 (1 920 ondelettes) à partir des données dispersées. Le modèle en ondelettes est filtré de la même manière que les données synthétiques.

La figure B.11.7 (page suivante) présente la reconstruction du champ sur les ondelettes à partir des données régulièrement réparties, l'écart entre cette reconstruction et le champ théorique ainsi que les résidus aux mesures. De même qu'en global, la reconstruction est très bonne. Sa précision correspond au bruit supposé.

La figure B.11.8 (page 121) présente la reconstruction du champ sur les ondelettes à partir des données irrégulière-ment réparties, l'écart entre cette reconstruction et le champ théorique ainsi que les résidus aux mesures. Les résidus de mesures sont très faibles, et reflètent la qualité de l'inversion. La reconstruction est assez fidèle au modèle au voisinage des données et ne crée pas d'oscillations parasites dans les zones lacunaires : on a, au contraire, une simple interpolation.

Conclusion

Les ondelettes sphériques semblent adaptées pour représenter le champ de pesanteur au vu des résultats des tests effectués. Toutefois, ce type de représentation pose des problèmes théoriques et de mise en œuvre : le caractère générateur des familles formées n'est pas démontré, l'hypothèse gaussienne ne s'applique pas et l'évaluation numérique de la famille duale est délicate. Notre objectif est maintenant d'appliquer ce type de décomposition à des données réelles à plus haute résolution que dans les tests synthétiques afin de calculer un modèle de champ local. Nous souhaitons également comparer les performances de différentes familles d'ondelettes afin de mieux comprendre comment interviennent les différents paramètres.

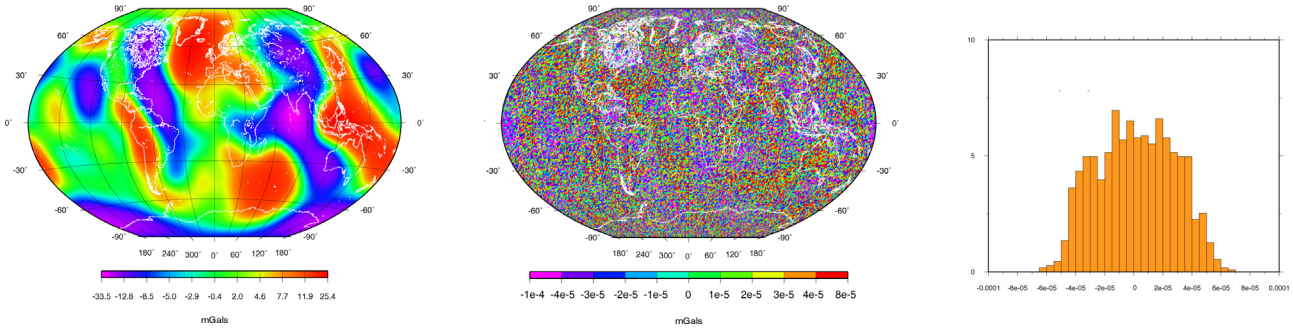


figure B.11.5

Reconstruction d'EGM96 sur les niveaux 1 à 4 du repère De La Vallé Poussin à partir de données grillées. Reconstruction (à gauche), résidus par rapport au modèle (au centre) et par rapport aux mesures en mGals (à droite).

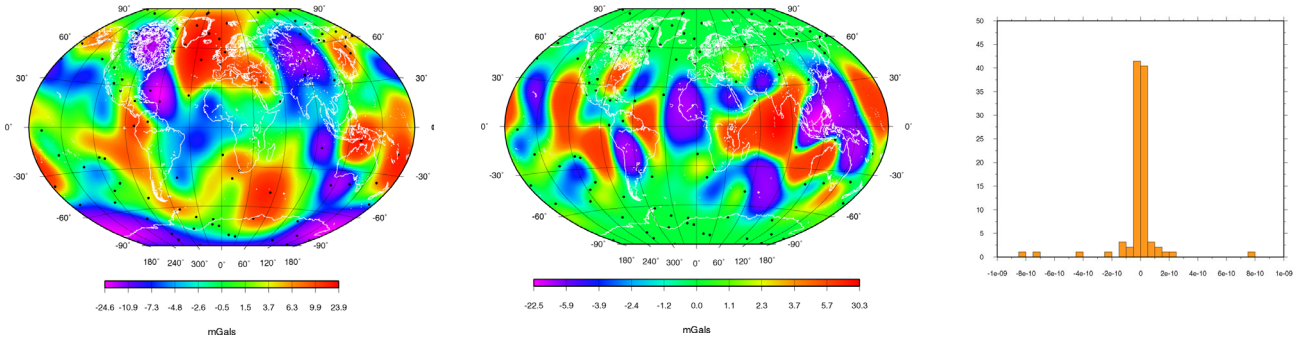


figure B.11.6

Reconstruction d'EGM96 sur les niveaux 1 à 3 du repère De La Vallé Poussin à partir de données dispersées. Reconstruction (à gauche), résidus par rapport au modèle (au centre) et par rapport aux mesures en mGals (à droite).

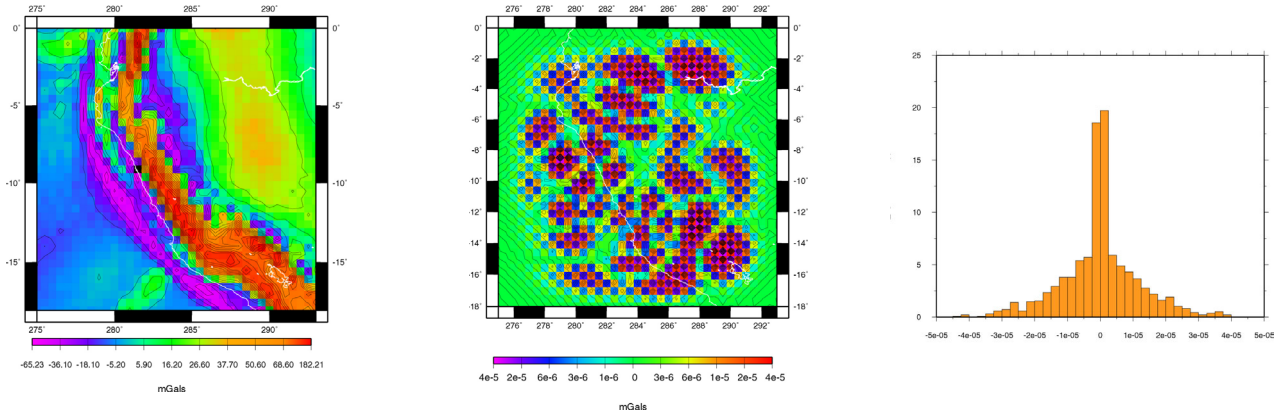


figure B.11.7

Reconstruction d'EGM96 sur les niveaux 3 à 9 du repère De La Vallé Poussin à partir de données grillées. Reconstruction (à gauche), résidus par rapport aux mesures et au modèle en mGals (au centre, à droite).

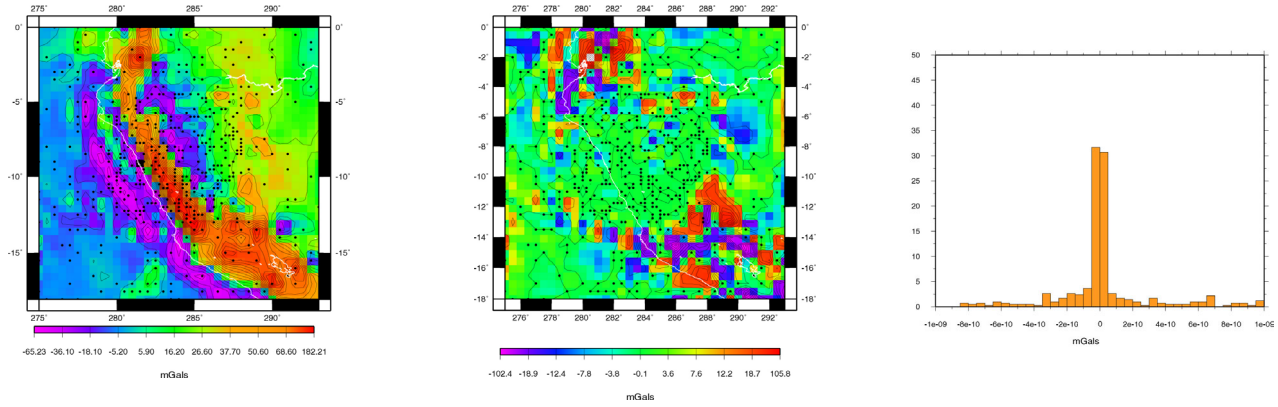


figure B.11.8

Reconstruction d'EGM96 sur les niveaux 3 à 8 du repère De La Vallé Poussin à partir de données dispersées. Reconstruction (à gauche), résidus par rapport au modèle (au centre) et par rapport aux mesures en mGals (à droite).

Références

[CRAMER 46] H. Cramer : *Mathematical methods of statistics,* Princeton University Press, Princeton, 1946.

[FREEDEN 98] W. Freeden, T. Gervens and M. Schreiner : *Constructive approximation on the sphere, with applications to geo-mathematics,* Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford, 1998.

[HOLSCHNEIDER 03] M. Holschneider, A. Chambodut and M. Mandea : *From global to regional analysis of the magnetic field on the sphere using wavelet frames,* in Phys. Earth Planet. Int., 135, pp. 107-124, 2003.

[MALLAT 00] S. Mallat : *Une exploration des signaux en ondelettes,* les Éditions de l'École Polytechnique, France, 2000.

[MORITZ 89] H. Moritz : *Advanced physical Geodesy,* Ed. Herbert Wichmann, Karlsruhe (D), 1989

B.12 Évaluation de la qualité des séries temporelles de mesures : signal et bruit

Karine Le Bail

Introduction

En géodésie, on collecte toutes sortes de mesures. Par exemple, des mesures d'angles (théodolite) et de distances (distancemètre) en géodésie terrestre ou bien des mesures satellitaires en géodésie spatiale, mesures de retard du signal pour les satellites GPS, de distance station-satellite pour les satellites LASER tels que Lageos ou Starlette, de l'effet DOPPLER pour le système spatial DORIS (Topex/Poséidon, Jason). Ces mesures sont collectées, prétraitées et affectées d'une date de mesure. On en forme ainsi des séries temporelles.

L'étude de telles séries de mesures se développe depuis quelques années, par exemple : [MAO et al 99]. On en trouve notamment dans le domaine des systèmes de référence (séries de coordonnées de stations, de paramètres de transformation et d'orientation de la Terre). De telles séries portent des informations en géophysique (étude du mouvement local de stations) mais elles sont dépendantes des différentes techniques de calcul (choix des modèles utilisés pour l'estimation).

Il est important d'avoir une vue d'ensemble de chaque série étudiée afin de recueillir le maximum d'informations exploitables. Nous faisons arbitrairement la distinction entre les deux domaines d'étude suivants : le domaine "bruit" qui permet de qualifier le type du processus et le domaine "signal" qui permet de déterminer et de quantifier les signaux systématiques tels que périodicité et tendance.

Cet exposé vise à comparer différentes méthodes pour l'étude des séries temporelles et de dégager les plus appropriées à chaque cas. Nous les appliquerons à trois exemples très différents. Par ailleurs, dans les méthodes de caractérisation du processus, nous verrons la fonction d'auto-corrélation et la densité spectrale de puissance, tirée de la théorie statistique principalement utilisée en économétrie, puis la variance d'Allan largement utilisée dans la métrologie du temps et des fréquences. Ensuite, pour la détermination du signal, nous exploiterons les séries avec le spectre de Fourier et la Singular Spectral Analysis (SSA) développée dans le cadre d'études météorologiques.

Les données

Nous utilisons trois séries temporelles de résidus (provenant de l'analyse par moindres carrés) de la coordonnée verticale de stations DORIS.

Les deux premières sont des séries mises en référence avec le logiciel CATREF (Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames) à partir de fichiers de coordonnées au format *Sinex* du JPL-IGN (disponibles sur le serveur : ftp://www.cddisa.nasa.gov). *Sinex* est un format d'échange de la géodésie spatiale qui a la propriété de porter non seulement les résultats échangés mais aussi leur matrice de variance-covariance.

Le repère de référence est l'ITRF2000. On a les résidus hebdomadaires des stations :

- Nouméa entre 1993 et 2001 (NOUA) ;
- Syowa entre 1999 et 2004 (SYPB).

La troisième série est donnée sur le site de l'International DORIS Service - IDS : http://www.ids.cls.fr.

Ce sont les résidus mensuels par rapport à un référencement propre au réseau DORIS considéré : on fixe la station Toulouse et les paramètres d'orientation de la Terre (EOP) et on estime ainsi les résidus des coordonnées des autres stations du réseau. La série choisie est celle de :

- Yellowknife entre 1993 et 2002 (YELA).

Ces trois séries ont été choisies parce qu'elles ont des caractéristiques différentes visibles sur leurs courbes respectives (figure B.12.1, page suivante) :

- NOUA : son niveau de bruit est élevé (5 cm) mais elle ne semble pas avoir de signal périodique ou de pente ;
- SYPB : un signal périodique se détache clairement ;
- YELA : le niveau de bruit est faible mais on distingue nettement une pente.

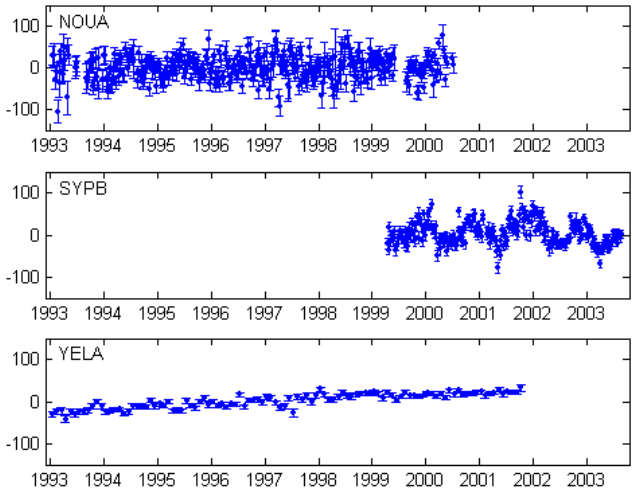


figure B.12.1 *: résidus (en millimètres) sur la coordonnée verticale des stations NOUA, SYPB et YELA*

Regard panoramique sur une série temporelle : le logiciel Crono_Vue

Le logiciel Crono_Vue est un outil qui permet de porter un regard panoramique sur une série chronologique. Il rassemble plusieurs méthodes mathématiques pour l'estimation d'une pente, l'extraction de composantes (tendance et termes cycliques) par la méthode Census X-11 (méthode de filtrage numérique développée pour les analyses économiques), en donne les périodogrammes, les variances d'Allan et plusieurs indicateurs statistiques usuels (écart-type, χ^2).

Les résultats se présentent sous forme d'une planche de plusieurs graphiques. Le tiers supérieur de la feuille concerne le signal lui-même, celui du milieu les termes périodiques et celui du bas le terme irrégulier. En décomposant la planche sur la largeur, la bande gauche concerne le contenu spectral, la bande centrale donne la série chronologique et ses composantes et la bande de droite l'analyse par la variance d'Allan.

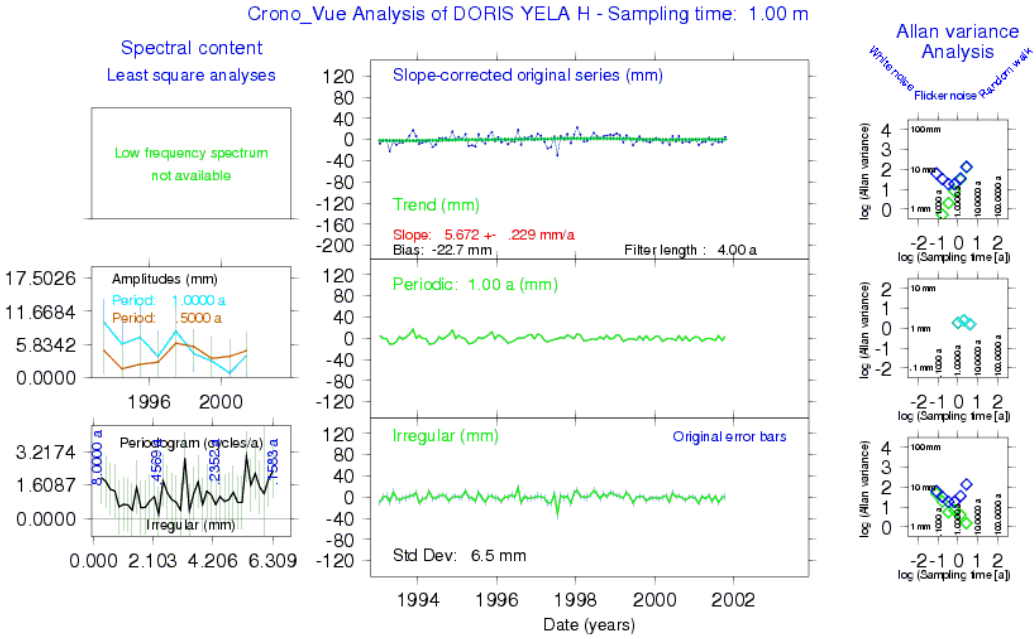


figure B.12.2 *: exemple de planche graphique obtenue avec Crono_Vue : la série YELA*

On applique Crono_Vue à nos trois séries en lui demandant d'investiguer un terme périodique à un an. On en tire plusieurs renseignements :

- NOUA : la dérive linéaire est nulle et l'analyse par la variance d'Allan indique un bruit blanc pour la série et sa composante irrégulière. Par contre, on ne perçoit pas de périodicité à un an ;
- SYPB : la variance d'Allan indique un bruit de scintillation. Mais la série est trop courte pour la recherche d'une périodicité d'un an. En effet, il faudrait que la durée de la série soit cinq fois plus grande que la période. Aussi, rien ne ressort pour cette série dans ce cadre ;

- YELA (figure B.12.2) : la pente a un coefficient élevé (5,7 mm/an) et la série est une marche aléatoire. Un léger terme périodique à un an se distingue sur le graphique du milieu.

Le logiciel Crono_Vue a été développé au laboratoire LAREG par M. Feissel-Vernier, voir : [FEISSEL-VERNIER 02]. Il peut être téléchargé à l'adresse : http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/software.html.

Toute série chronologique peut être considérée comme un processus stochastique (processus aléatoire indexé par le temps), $x(t)$, où $t \in I$, I intervalle borné et fini.

Dans la suite, on note $x(t)$ les points de nos séries au temps t. Les notations choisies sont celles de l'ouvrage de C. Gouriéroux et A. Montfort : [GOURIÉROUX, MONFORT 95].

Étude du bruit d'une série chronologique

Un premier volet de l'étude de $(x(t))_{t \in I}$ concerne son bruit. Sa connaissance permet de qualifier la stabilité de la série.

Stationnarité d'un processus : fonction d'auto-corrélation

Un processus est dit stationnaire si son espérance ($E(x(t)) = \frac{1}{card(I)} \sum_{t \in I} x(t)$) ne dépend pas du temps et que, pour un τ donné, $\mathrm{cov}(x(t), x(t+\tau)) = E(x(t))E(x(t+\tau)) - E(x(t), x(t+\tau))$ ne dépend que de τ. ne dépend que de τ.

Soit R la fonction d'auto-covariance de x définie par :

$$R(\tau, t) = E(x(t)x(t+\tau)).$$

On appelle τ le retard.

La fonction d'auto-corrélation est alors :

$$\Gamma(\tau) = \frac{R(\tau)}{R(0)}.$$

Si elle décroît très lentement, cela signifie que le processus considéré est non stationnaire.

En traçant cette fonction pour nos trois exemples (figure B.12.3, page suivante), on observe que pour le premier (NOUA), il n'y a pas d'ambiguité, le processus est effectivement stationnaire, alors que ce n'est pas le cas pour le troisième exemple (YELA), la fonction d'auto-corrélation indique que le processus est non stationnaire.

Détermination du type de bruit

On peut déterminer le type de bruit d'une série chronologique si le processus est stationnaire, comme je l'ai déjà explicité. Si c'est le cas, il existe plusieurs méthodes pour caractériser le type de bruit. Nous en exposons deux ici. La méthode par décomposition ARMA (Auto Régressif à Moyenne Mobile) ne sera pas développée puisque cela a été préalablement fait dans l'article de P. Sillard [SILLARD et al 01].

Densité spectrale

La densité spectrale de puissance (DSP) est la transformée de Fourier de l'auto-covariance :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau.$$

Le processus est caractérisé par le comportement de F en fonction de la fréquence ω. Le processus est :

- un bruit blanc si $F(\omega) \sim 1$;
- un bruit de scintillation si $F(\omega) \sim \frac{1}{\omega}$;
- une marche aléatoire si $F(\omega) \sim \frac{1}{\omega^2}$.

La DSP des trois séries étudiées est montrée sur la figure B.12.4, page suivante. Pour la série NOUA, la DSP indique que le processus est un bruit blanc (puisque le processus est stationnaire). Pour SYPB, elle indique que le processus est un bruit de scintillation. On ne s'engagera pas pour YELA puisque le processus n'est pas nettement stationnaire.

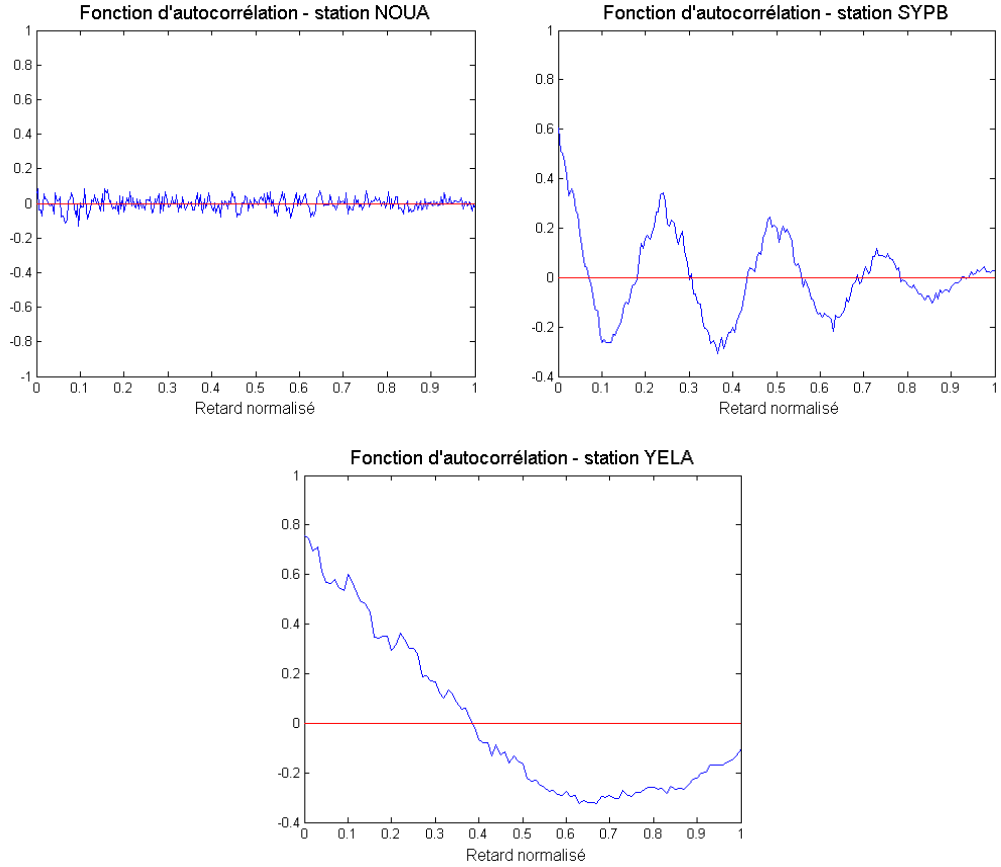


figure B.12.3 *: fonctions d'auto-corrélation pour les séries NOUA, SYPB et YELA*

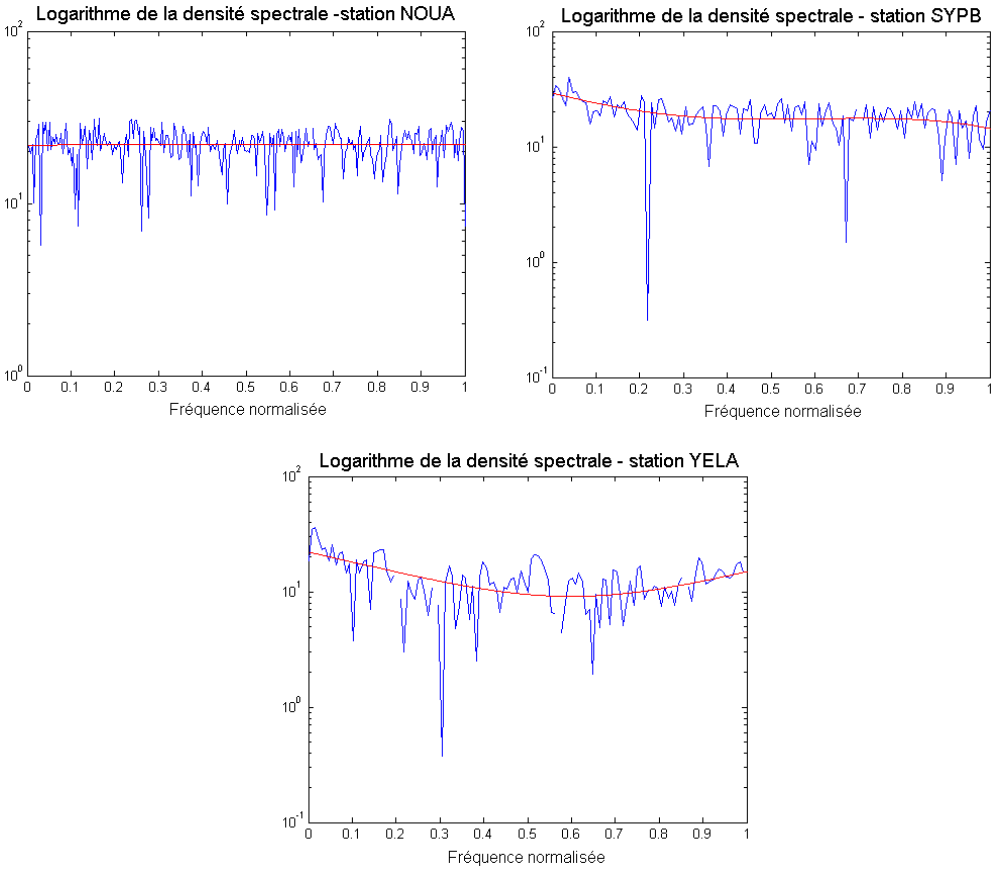


figure B.12.4 *: densité spectrale de puissance des séries NOUA, SYPB et YELA*

Variance d'Allan

La variance d'Allan est un outil très utilisé dans le domaine du temps et des fréquences, notamment dans l'étude de la stabilité des horloges atomiques au Bureau International des Poids et Mesures [RUTMAN 78]. On l'applique ici à nos séries temporelles.

La formule de la variance d'Allan est ([ALLAN 66]) :

$$\sigma_{\bar{x}}^2(\tau) = \frac{1}{2} < (\bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k)^2 >$$

où τ est le temps d'échantillonnage, et $\bar{x}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} x(t)\,dt$ et $< . >$ représente la moyenne.

Si le processus est stationnaire, l'évolution de la variance d'Allan en fonction du temps d'échantillonnage τ est reliée à la densité spectrale du processus $(S_x(\omega) = h_\alpha \omega^\alpha)$ par la relation suivante :

$$\sigma_{\bar{x}}^2(\tau) = \int_0^{+\infty} S_x(\omega_i) \frac{2\sin^4(\pi\tau\omega_i)}{(\pi\tau\omega_i)^2}\,d\omega$$

Ainsi, lorsqu'on représente la variance d'Allan dans un graphe tel que : $\log\sigma_{\bar{x}}^2 = \mu \log\tau$, le spectre de bruit du processus peut être déterminé d'après la pente du graphe, comme suit :

- si $\mu = -1$, bruit blanc (densité spectrale indépendante de la fréquence ω) ;
- si $\mu = 0$, bruit de scintillation (densité spectrale variant en $\frac{1}{\omega}$) ;
- si $\mu = 1$, marche aléatoire (densité spectrale variant en $\frac{1}{\omega^2}$).

Cependant, la variance d'Allan permet aussi de déterminer un signal périodique puisque la théorie dit qu'une perturbation périodique se traduit sur la variance d'Allan par un biais. Sur la courbe log/log, cela se traduit par des rebonds, dont l'espacement dépend de la période du signal périodique [VERMOTTE 91].

De plus, s'il existe une pente importante dans une série, la variance d'Allan en est très perturbée. Si on simule une série avec un bruit blanc puis on lui ajoute une pente importante, la variance d'Allan indique que le processus est une marche aléatoire. Ajouter une pente importante à la série revient à corréler ses points, ce qui fait dégénérer le bruit.

Les résultats (figure B.12.5) nous donnent que :

- pour NOUA, la caractérisation du processus est en accord avec la DSP puisqu'on observe un bruit blanc ;
- pour SYPB, on se retrouve dans le même cas : bruit de scintillation confirmée. De plus, on observe un rebond au point qui correspond à un temps d'échantillonnage d'un an et qui indique une périodicité d'un an dans la série ;
- pour YELA, le processus semble être un bruit blanc jusqu'à un taux d'échantillonnage d'un an et une marche aléatoire par la suite mais le processus n'est pas nettement stationnaire. Ceci est expliqué par la présence de la pente avec un fort coefficient par rapport aux résidus (plus de 5 mm/an pour des résidus de quelques millimètres) : la série est auto-corrélée.

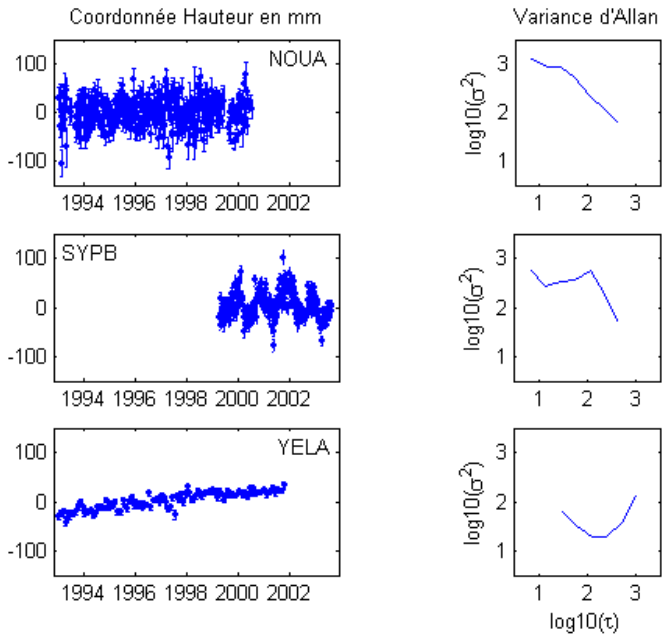


figure B.12.5 *: les séries NOUA, SYPB et YELA et leurs variances d'Allan*

Recherche d'un signal périodique ou pseudo-périodique dans une série chronologique

Lorsque l'on regarde attentivement une série chronologique, la recherche de signatures récurrentes dans le signal est intéressante. En effet, on a vu précédemment qu'une simple pente fait dégénérer le type de bruit de la série, aussi, il faut pouvoir les détecter. De plus, dans notre cas, chercher la tendance et les termes périodiques donne des indications sur le mouvement non modélisé de la station et les erreurs dues à la stratégie de calcul.

Spectre de Fourier

La technique la plus utilisée pour cette étude est le calcul des coefficients de la transformée de Fourier de la série considérée. Ces coefficients sont donnés par la formule suivante :

$$X(k) = \sum_{j \in I} x(j)(e^{-\frac{2\pi i}{card(I)}})^{(j-1)(k-1)}$$

où $x(j)$ sont les termes de la série et I l'intervalle sur lequel s'étend la série.

La transformée de Fourier est généralement représentée sur un graphique avec la période en abscisse (ici, des semaines ou des mois). Les pics représentent les périodes présentes dans la série et leur amplitude. Appliquée à nos trois séries, cette méthode donne les résultats de la figure B.12.6 (ci-dessous).

On voit apparaître systématiquement un pic à un an pour les trois séries, beaucoup plus important pour la série SYPB, et un pic à huit semaines (deux mois) pour la série NOUA. On ne connaît pas le sens de la périodicité à un an dans notre cas. Il semblerait que cela est un systématisme dans le calcul dû à l'estimation des paramètres d'orientation de la terre (EOP).

Singular Spectral Analysis (SSA)

Cette méthode a été développée pour l'étude temporelle de champs de paramètres météorologiques couvrant la planète à une douzaine de couches en altitude. Elle est basée sur le calcul des vecteurs propres de la matrice d'auto-covariance, voir [GHIL et al 02]. On décompose son procédé en trois étapes.

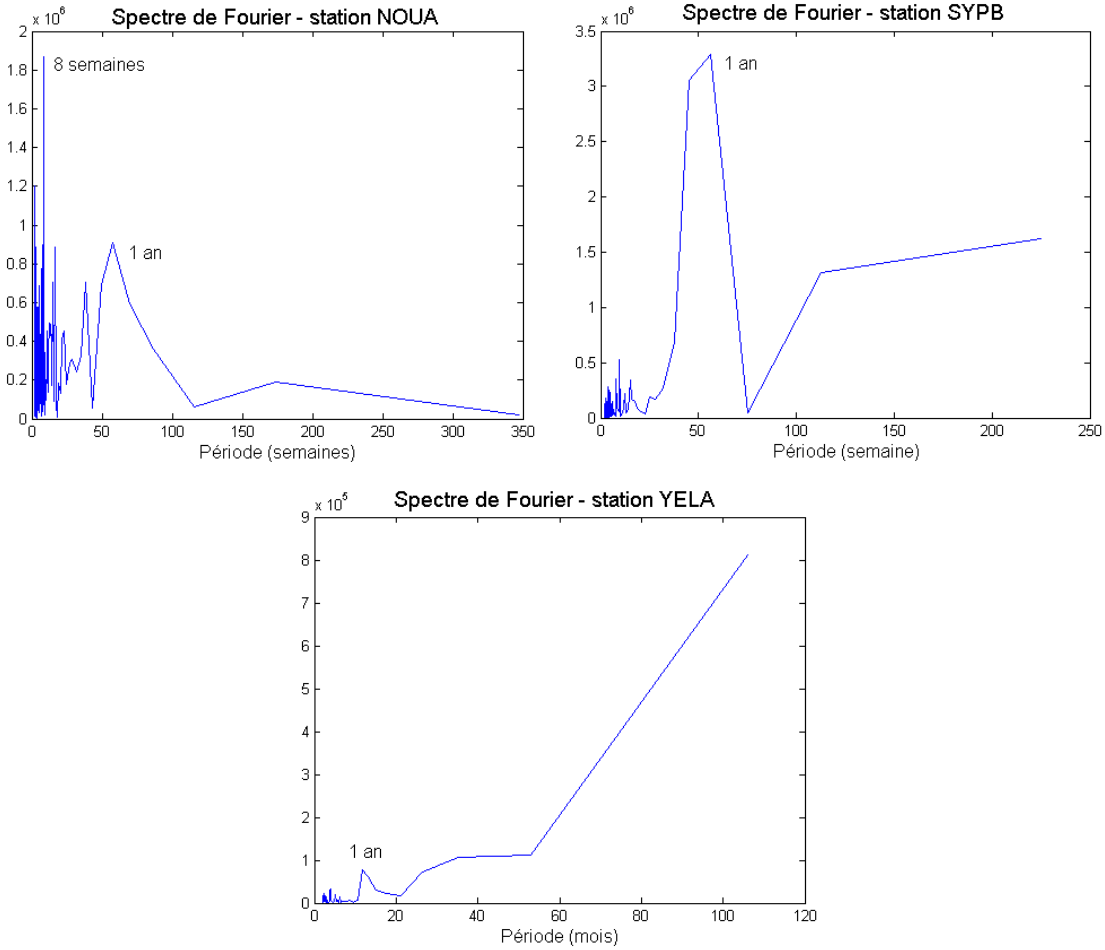


figure B.12.6 *: spectres de Fourier des séries NOUA, SYPB et YELA*

Choix d'un retard de covariance M

C'est l'étape la plus délicate puisque cela revient en fait à tester une certaine périodicité et donc à bien connaître les effets liés à la série étudiée. Une fois M choisie, on découpe le signal en morceaux de longueur M de sorte que :

$$D = \begin{pmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(M) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(M+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-M+1) & x(N-M+2) & \cdots & x(N) \end{pmatrix}$$

La matrice d'auto-covariance C est de taille (M,M) et s'écrit : $C = D^t D$.

Étude des valeurs propres de la matrice C

On détermine les M valeurs propres de la matrice C. En les représentant dans un diagramme à barres en ordre décroissant, on identifie immédiatement les valeurs propres isolées et les valeurs propres proches.

La théorie de la SSA donne :

- valeur propre isolée = tendance ;
- deux valeurs propres proches = signal périodique.

Les valeurs propres petites constituent le bruit du signal.

Projection de la série originale sur les vecteurs propres et reconstruction des composantes.

Appliquée à nos séries et en donnant comme retard de covariance les périodes obtenues précédemment, on obtient les résultats suivants.

NOUA

Pour un retard de covariance de un an (M = 52 semaines), deux valeurs propres proches se détachent des 50 restantes, ce qui indique une composante cyclique. Après reconstruction de cette composante, on superpose le signal avec la composante dans le graphe B.12.7, ci-dessous. Cela représente sensiblement l'allure des variations de la courbe mais pas de manière nette. Il faut souligner que les deux valeurs propres proches n'expliquent à peine que 10% du signal. Il n'en ressort pas clairement un signal périodique. Il en est de même en prenant un retard de covariance de deux mois (M = 8 semaines).

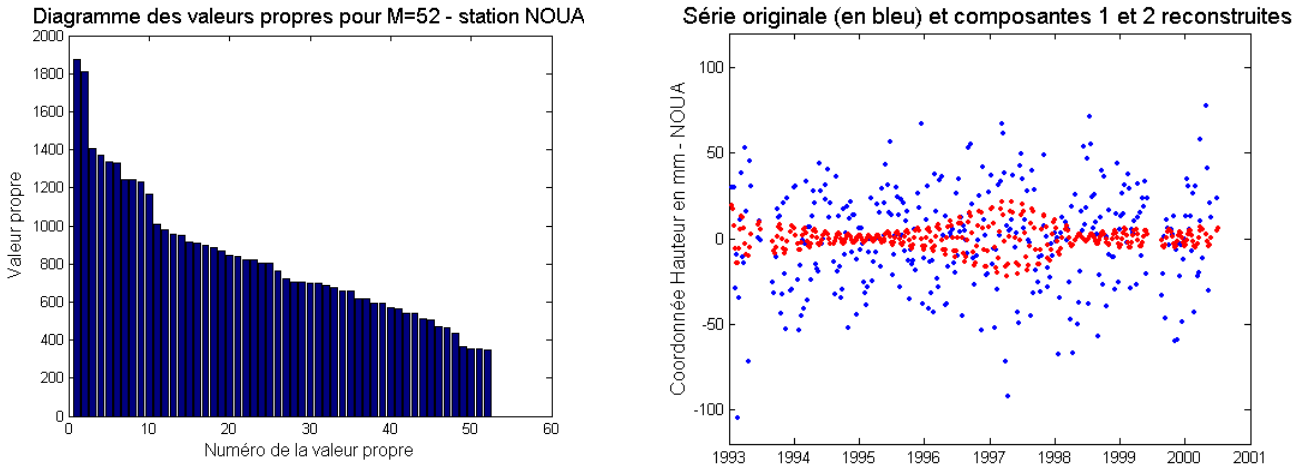


figure B.12.7 *: série NOUA.*

Diagramme en barres des 52 valeurs propres étudiées et superposition de la série avec sa composante périodique.

SYPB

En prenant M = 52 semaines, soit un an, il ressort bien du diagramme des valeurs propres une composante périodique (les deux premières valeurs propres) et une tendance (la troisième valeur propre). Cependant, il reste 50% du signal inexpliqué. Dans le graphique représentant le signal et ses deux principales composantes, on voit que le signal périodique suit effectivement les variations du signal mais que reste un bruit important. La tendance semble indiquer un point de la fin de l'année 2002.

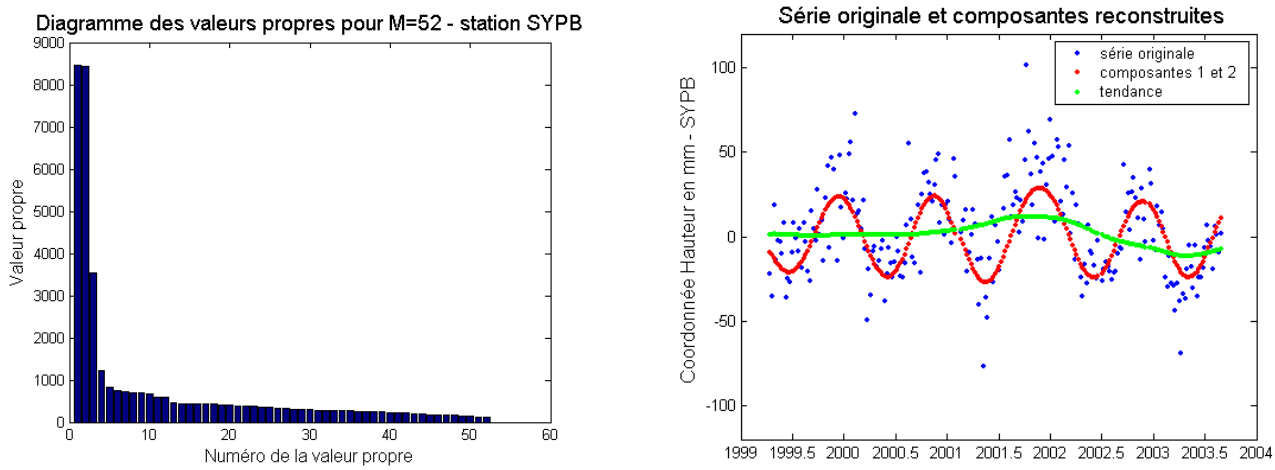


figure B.12.8 *: série SYPB.*

Diagramme en barres des cinquante-deux valeurs propres étudiées
et superposition de la série avec la composante périodique et la tendance reconstruites

YELA

Puisque cette série est mensuelle, on découpe le signal en douze points (une année). Il en ressort une composante qui explique la moitié du signal. Nous voyons clairement cette tendance sur la courbe de la station et elle ressort avec Crono_Vue. Par contre, le spectre de Fourier la noie puisque ce n'est pas un signal strictement périodique.

Ces deux méthodes sont complémentaires puisque certains éléments ressortent mieux pour l'une que pour l'autre. Il existe aussi la méthode par décomposition en ondelettes du signal qui permet de faire ressortir les termes périodiques. Son avantage est qu'elle peut détecter un signal transitoire dans la série, contrairement aux méthodes du spectre de Fourier et de la SSA. Nous ne l'exposerons pas ici mais on en trouvera un développement dans l'exposé de A. Rivoldini & F. Renaud [RIVOLDINI 03].

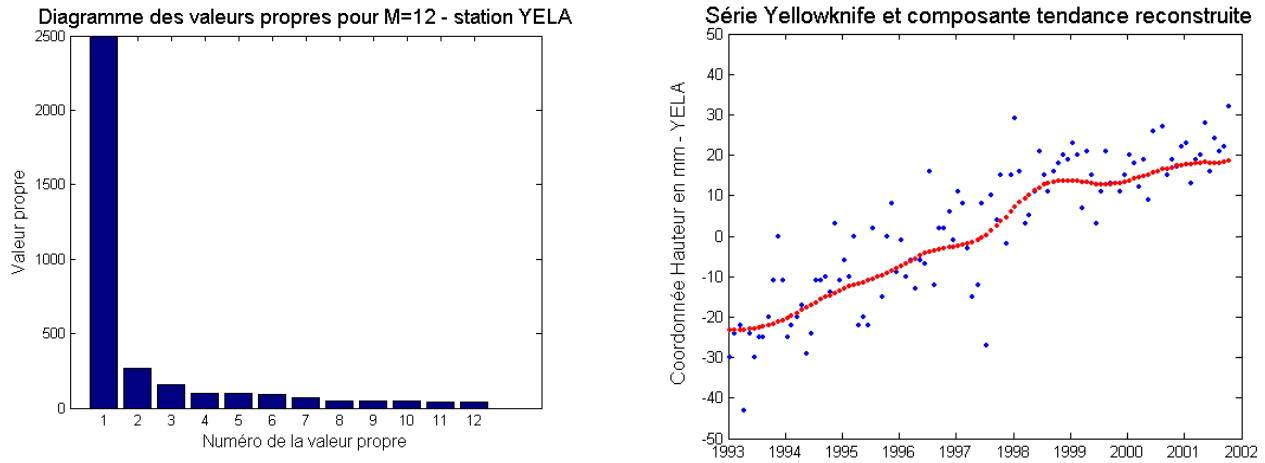


figure B.12.9 *: série YELA.*

Diagramme en barres des douze valeurs propres étudiées et superposition de la série avec sa tendance reconstruite.

Conclusion

Les méthodes explicitées dans cet exposé permettent de faire une étude complète d'une série chronologique en distinguant les deux domaines définis a priori comme "signal", modélisé analytiquement et "bruit", modélisé comme processus statistique, figure B.12.10.

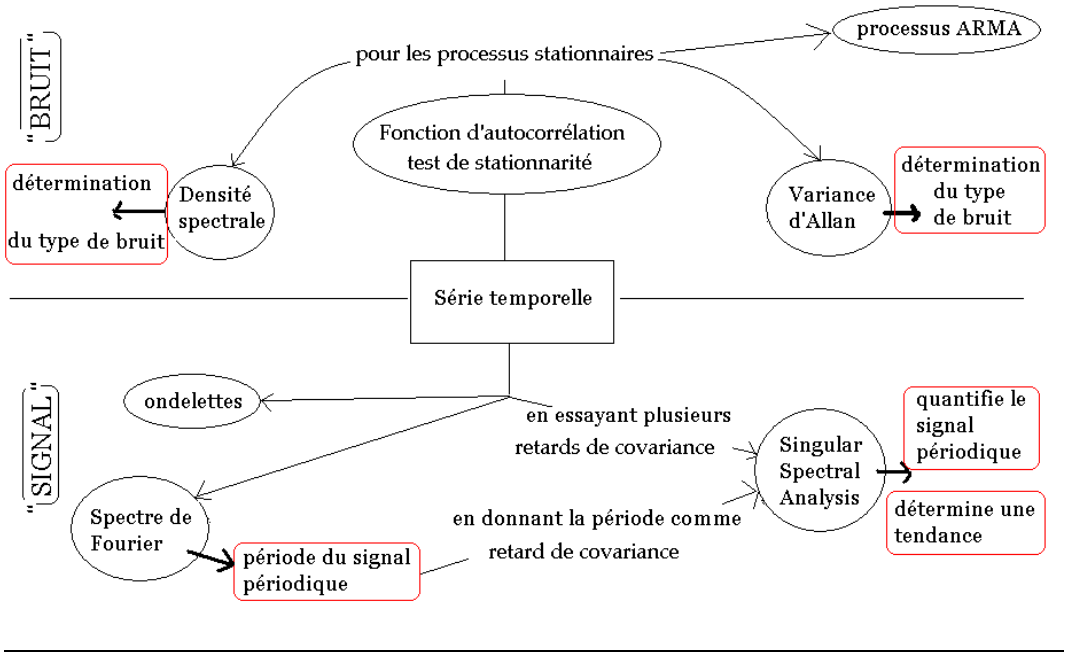


figure B.12.10 *: schéma d'étude "signal / bruit" d'une série chronologique*

Si on récapitule les résultats pour chaque série, on a, pour les stations suivantes :

NOUA

Le processus est clairement stationnaire et le bruit déterminé est le bruit blanc. Ce qui signifie que chaque point de la série est indépendant. Dans le domaine du signal, on observe deux petites composantes périodiques à un an et deux mois mais la signification doit être reliée à la stratégie de calcul.

SYPB

Le processus semble stationnaire et on obtient du bruit de scintillation. Cependant, on observe clairement un signal périodique à un an et la tendance semble prêter attention à un point, fin 2002. Il faudrait vérifier l'existence d'un phénomène soit géophysique, soit du à un changement d'antenne (mais la tendance semble reprendre sa place ensuite), soit à une mauvaise connaissance d'un des paramètres qui sert à l'estimation des résidus de coordonnées.

YELA

Le processus ne semble pas stationnaire et les indicateurs de bruit donnent une marche aléatoire. Il faudrait refaire l'étude pour Yellowknife en retirant une pente pour déterminer le type de bruit résultant. Concernant le signal, une petite composante périodique à un an est décelée par le spectre de Fourier (et la variance d'Allan) mais la composante la plus marquée est la tendance qui confirme ce qui a été dit précédemment.

En conclusion générale, chaque série temporelle a des caractéristiques différentes qui ne peuvent pas toutes être mises en évidence par une seule méthode. Certaines de ces méthodes sont plus sensibles aux pentes par exemple (variance d'Allan) ou à la stationnarité du processus, d'autres identifient les périodes ou bien déterminent les composantes du signal. D'où l'avantage de répertorier les méthodes existantes afin de tirer le maximum d'informations sur chaque série étudiée.

Références

[ALLAN 66] D.W. Allan : *Statistics of atomic frequency standards*, in Proceedings IEEE 54, 221, 1966.

[GHIL et al 02] M. Ghil, M.R. Allen, M.D. Dettinger, K. Ide, D. Kondrashov, M.E. Mann, A.W. Robertson, A. Saunders, Y. Tian, F. Varadi and P. Yiou : *Advanced spectral method for climatic time series,* in Reviews of Geophysics, 40(1), pp. 3.1-3.41, 10.1029/2000GR000092, 2002.

[GOURIÉROUX, MONFORT 95] C. Gouriéroux & A. Montfort : *Séries temporelles et modèles dynamiques*, 2ème édition, in Economica, 1995.

[MAO et al 99] A. Mao, C.G.A. Harrisson and T.H. Dixon : *Noise in GPS coordinate time series,* in Journal of Geophysical Research, vol. 104, n° B2, pp. 2797-2816, 1999.

[RIVOLDINI 03] A. Rivoldini & F. Renaud : *Le signal du marégraphe de Brest vu par les ondelettes*, voir sur le site : http://lareg.ensg.ign.fr/AGRET/coll_03/rivoldini.pdf, communication au GdR G2, 13 novembre 2003.

[RUTMAN 78] J. Rutman : *Characterization of Phase and Frequency Instabilities in Precision Frequency Sources : Fifteen Years of progress,* in Proceedings IEEE 66, 1048, 1978.

[VERNOTTE 91] F. Vernotte : *Stabilité temporelle des oscillateurs : nouvelles variances, leurs propriétés, leurs applications,* thèse de doctorat de l'Université de Besançon, 1991.

Publications

[FEISSEL-VERNIER 02] M. Feissel-Vernier : *Crono_Vue : regards croisés sur les séries chronologiques*, http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/software.html, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, Marne-la-Vallée, 2002.

[SILLARD et al 01] P. Sillard, S. Botton & D. Bouteloup : *Un exemple de traitement de séries temporelles de positions d'instrument géodésique*, in Bulletin d'information de l'IGN n°72, pp. 1-14, 2001, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, Marne-la-Vallée, 2001.

B.13 Effet de moyenne par moindres carrés, application à l'analyse des séries temporelles laser

David Coulot [1,2] & Philippe Berio [2]

[1] *IGN/LAREG - Marne-la-Vallée (77)*
[2] *Observatoire de la Côte d'Azur/GEMINI - Équipe Géodésie et Mécanique Céleste - Grasse (06)*

Introduction

La qualité actuelle des mesures (exactitude, précision et distribution spatio-temporelle) des diverses techniques de géodésie spatiale (télémétrie laser, GPS, DORIS et VLBI) permet, depuis plusieurs années maintenant, de mieux appréhender la variabilité temporelle des phénomènes physiques que cette science étudie (déformations de la croûte terrestre, transferts de masse, phénomènes géodynamiques locaux, etc) *via* les produits qu'elle fournit (catalogue de positions de stations d'observation terrestres type ITRF [ALTAMIMI 02], séries temporelles de Paramètres de Rotation de la Terre [IERS 04a], séries temporelles de coefficients du champ de gravité [DELEFLIE 02].

De ce fait, l'estimation de séries temporelles de paramètres physiques a pris une importance considérable ces dernières années en géodésie, comme le montrent les textes consacrés à la détermination de telles séries [COULOT et al 02], [NICOLAS 00], [DAVIES, BLEWITT 00], entre autres exemples, ou à leur analyse [SILLARD 01a], [AGNEW 92], [LANGBEIN, JOHNSON 97], [MAO et al 99], etc. L'expérience pilote lancée par le Service International de la Rotation de la Terre et des Systèmes de Référence [IERS 04b] est également une bonne illustration de cette importance accrue des séries temporelles géodésiques.

Le contexte de cet article est le positionnement de stations d'observation terrestres mais le propos peut être aisément étendu à d'autres domaines (champ de gravité, par exemple). Le but des séries temporelles de positions de stations terrestres est double. Ces séries doivent tout d'abord permettre l'élaboration de repères de référence combinée à la détermination de Paramètres de Rotation de la Terre. Elles doivent également permettre de mettre en évidence les phénomènes géodynamiques liés à la réponse de la croûte terrestre aux diverses excitations qu'elle subit (déplacements des masses océaniques et atmosphériques ou excitations locales comme les séismes, par exemple). Dans cette dernière optique, il est impératif de disposer de séries temporelles exactes et précises mais, surtout, qui représentent au mieux les effets physiques sous-jacents.

Les séries temporelles actuellement calculées suivent toujours le même schéma. Les effets géodynamiques les mieux connus sont modélisés et des appoints constants par rapport à ces modèles sont estimés par compensation par moindres carrés. La période d'estimation est variable suivant les techniques (une journée pour le GPS, environ une semaine pour les autres techniques telles que la télémétrie laser). Pourquoi procéder ainsi ? Tout simplement pour disposer d'une bonne répartition des mesures utilisées pour la compensation, parce que l'on ne connaît pas (ou, du moins, pas complètement) les phénomènes physiques que l'on veut ainsi mettre en évidence et, surtout, parce que, ce faisant, on espère que les appoints constants estimés vont refléter la moyenne des signaux non modélisés sur l'intervalle de temps considéré.

Nous verrons dans un premier temps que ce n'est pas le cas dans la mesure où il faut tenir compte d'un effet de « moyenne par moindres carrés » que nous présenterons en détail. Cet effet est source d'inexactitude pour les séries temporelles estimées. Pour pallier cet effet, il faut donc repenser le modèle d'estimation de ces séries d'appoints aux modèles afin de mieux appréhender la physique des phénomènes sous-jacents. Nous étudierons alors un modèle alternatif basé sur des séries de termes périodiques et, enfin, un modèle alternatif reposant sur la décomposition des signaux physiques étudiés sur une base d'ondelettes.

L'effet de « moyenne par moindres carrés »

Considérons l'ajustement par moindres carrés d'une série temporelle d'un vecteur de paramètres $\vec{X}$.

Les quantités physiques représentées par ces paramètres varient en fonction du temps et on suppose qu'une part $(\vec{X}_0 t)$ de ces paramètres est modélisée. On veut donc estimer la part inconnue (ou mal connue) $\delta\vec{X}(t)$.

Ces appoints varient eux-aussi en fonction du temps mais, afin de pouvoir utiliser un ensemble de mesures satisfaisant (tant en nombre qu'en répartition géographique de ces dernières), ou afin d'utiliser un modèle physique « simple », ces appoints sont ajustés comme s'ils étaient constants sur une période de temps donnée (typiquement entre deux instants t_1 et t_m).

C'est une configuration de calcul classique en géodésie spatiale et pas uniquement dans le domaine du positionnement [DELEFLIE 02]. Ainsi, on considère que les appoints constants ajustés vont correspondre aux moyennes temporelles ou statistiques des signaux physiques réels non modélisés. Ce n'est pas le cas, comme nous le montrons dans cette partie.

Mise en évidence théorique de l'effet de « moyenne par moindres carrés »

Pour des considérations théoriques sur la méthode d'estimation par moindres carrés, nous invitons le lecteur à se reporter à [SILLARD 01b].

Considérons une mesure $m(t)$ enregistrée au temps t. Cette mesure est modélisée par la fonction modèle f comme suit :

$$m(t) \cong f(t,\vec{X}_0(t)) \qquad (1)$$

Le vecteur $\vec{X}$ représente les paramètres physiques dignes d'intérêt. Les appoints $\delta\vec{X}$ sur ces paramètres sont supposés constants dans la modélisation utilisée pour l'estimation par moindres carrés.

Le développement limité de la fonction modèle f par rapport au vecteur $\vec{X}$ (au voisinage du vecteur des valeurs approchées des paramètres $\vec{X}_0(t)$ donne l'équation d'observation linéarisée :

$$m(t) \cong f(t,\vec{X}_0(t)) + \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t,\vec{X}_0(t)).\delta\vec{X} \qquad (2)$$

où $\frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t,\vec{X}_0(t))$ désigne la matrice ligne des dérivées partielles de la fonction modèle f au point $(t,\vec{X}_0(t))$.

Ainsi, à chaque instant de mesure t, le vrai signal physique $\vec{X}(t)$ est donné par $\vec{X}(t) = \vec{X}_0(t) + \delta\vec{X}(t)$ mais, dans le cadre de l'ajustement par moindres carrés, $\delta\vec{X}(t)$ est supposé constant sur l'intervalle $[t_1, t_m]$.

La mesure $m(t)$ contient physiquement le vrai signal $\delta\vec{X}(t)$ que l'on cherche à mettre en évidence en ajustant $\delta\vec{X}$ par moindres carrés. On peut aussi linéariser cette mesure avec la précédente fonction modèle f :

$$m(t) \cong f(t,\vec{X}_0(t)) + \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t,\vec{X}_0(t)).\delta\vec{X}(t) \qquad (3)$$

L'équation d'observation linéarisée correspondante peut donc être écrite sous la forme :

$$f(t,\vec{X}_0(t)) + \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t,\vec{X}_0(t)).\delta\vec{X} \cong f(t,\vec{X}_0(t)) + \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t,\vec{X}_0(t)).\delta\vec{X}(t) \qquad (4)$$

le membre de gauche correspondant à la modélisation utilisée pour la compensation par moindres carrés et le membre de droite à la linéarisation au premier ordre de la mesure physique.

Sous forme matricielle (A désigne la matrice modèle), le système d'observations peut s'écrire comme suit :

$$\vec{Y} \cong A.\delta\vec{X} \qquad (5)$$

où :

$$\vec{Y} = \begin{pmatrix} m(t_1) - f(t_1,\vec{X}_0(t_1)) \\ m(t_2) - f(t_2,\vec{X}_0(t_2)) \\ \vdots \\ m(t_m) - f(t_m,\vec{X}_0(t_m)) \end{pmatrix} \text{ et } A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_1,\vec{X}_0(t_1)) \\ \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_2,\vec{X}_0(t_2)) \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_m,\vec{X}_0(t_m)) \end{bmatrix}$$

Tenant compte du développement au premier ordre (3), on peut également écrire :

$$\vec{Y} \cong \tilde{A}.\delta\tilde{\vec{X}} \qquad (6)$$

avec :

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_1,\vec{X}_0(t_1)) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_2,\vec{X}_0(t_2)) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_m,\vec{X}_0(t_m)) \end{bmatrix} \text{ et } \delta\tilde{\vec{X}} = \begin{pmatrix} \delta\vec{X}(t_1) \\ \delta\vec{X}(t_2) \\ \vdots \\ \delta\vec{X}(t_m) \end{pmatrix}$$

La compensation par moindres carrés (effectuée avec une matrice de poids P donne alors le résultat suivant pour le vecteur des paramètres $\delta\vec{X}$ (au premier ordre) :

$$\delta\hat{\vec{X}} = \left(A^T PA\right)^{-1} A^T P\vec{Y} \cong \left(A^T PA\right)^{-1} A^T P\tilde{A}.\delta\tilde{\vec{X}} \qquad (7)$$

Remplaçant alors $\delta\tilde{\vec{X}}$ par $(\delta\tilde{\vec{X}} - \delta\tilde{\vec{X}}_{moyen}) + \delta\tilde{\vec{X}}_{moyen}$ avec $\delta\tilde{\vec{X}}_{moyen} = \left(\delta\vec{X}^T_{moyen}, \cdots, \delta\vec{X}^T_{moyen}\right)^T$, $\delta\vec{X}_{moyen} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\delta\vec{X}(t_i)$ pour la moyenne statistique du signal « vue » au travers des instants de mesure et $\delta\vec{X}_{moyen} = \frac{1}{t_m - t_1}\int_{t_1}^{t_m}\delta\vec{X}(u)du$ pour la moyenne temporelle du signal sur l'intervalle $[t_1, t_m]$, comme $\tilde{A}.\delta\tilde{\vec{X}}_{moyen} = A.\delta\vec{X}_{moyen}$, on obtient finalement :

$$\delta\hat{\vec{X}} = \left(A^T PA\right)^{-1} A^T P\vec{Y} \cong \delta\vec{X}_{moyen} + \left(A^T PA\right)^{-1} A^T P\tilde{A}.(\delta\tilde{\vec{X}} - \delta\tilde{\vec{X}}_{moyen}) \qquad (8)$$

$\delta\vec{X}$ contient donc les moyennes temporelles ou statistiques des signaux physiques réels non modélisés mais avec un terme additionnel non nécessairement négligeable. Ce terme peut être source d'inexactitude pour les séries temporelles. De plus, il doit être pris en compte pour comparer exactement modèles physiques moyennés temporellement et séries temporelles ajustées par moindres carrés.

Enfin, comme tout défaut de modélisation, cet effet de « moyenne par moindres carrés » affecte les résidus de l'estimation. De plus, si d'autres paramètres sont estimés lors de la même compensation que les paramètres d'intérêt $\delta\vec{X}$, ils peuvent être affectés par cet effet de « moyenne ». Le lecteur est invité à se reporter à l'annexe de l'article pour plus de détails sur ces deux aspects.

Exemple numérique

Contexte

Nos travaux de recherche sur la télémétrie laser [COULOT et al 02] ont pour but de calculer des séries temporelles de positions de stations laser (couplées à l'estimation de séries temporelles de Paramètres de Rotation de la Terre). Afin de mettre en évidence et d'étudier des phénomènes physiques tels que les effets de charges atmosphérique ou océanique, nous recherchons un échantillonnage satisfaisant (typiquement dix jours, au plus) et surtout une bonne exactitude (cinq millimètres, au plus) sur ces séries de positions.

Pour ce faire, nous utilisons une méthode de calcul semi-dynamique reposant sur les deux satellites géodésiques LAGEOS-1 et -2. Nous utilisons des arcs d'orbite de dix jours corrigés des erreurs orbitales résiduelles et des mesures de télémétrie laser pour déterminer des appoints sur les positions de stations constants sur dix jours.

Les solutions initiales utilisées sont les positions des stations fournies dans l'ITRF2000 [ALTAMIMI et al 02] corrigées de la tectonique des plaques ainsi que des marées terrestres et polaire (en accord avec les conventions IERS96 [MC CARTHY 96]). Les phénomènes non modélisés sont donc principalement les effets de charges atmosphérique et océanique ainsi que des effets géodynamiques locaux voire les « manques » des modèles utilisés pour les solutions approchées.

Effet de « moyenne par moindres carrés »

L'effet de « moyenne par moindres carrés » précédemment décrit affecte les séries temporelles de positions de stations que nous estimons. La série temporelle (courbe verte) montrée figure B.13.1, page suivante, d'appoints sur la composante verticale de la station laser de Grasse a été calculée avec des mesures simulées. Le schéma B.13.1, page suivante, résume la constitution de telles mesures simulées.

Les effets de charge atmosphérique (modèle de P. Gégout [GÉGOUT 03] et océanique : modèle de Schwiderski [IERS 96]) ont été utilisés pour la création des mesures. La série temporelle calculée doit donc mettre en évidence ces effets de charge non pris en compte dans la solution initiale utilisée pour la compensation par moindres carrés.

La courbe bleue représente les moyennes statistiques (vues au travers des instants de mesure) des effets de charge. La courbe verte représente les appoints constants sur dix jours sur la composante verticale dont on espère qu'ils représentent les moyennes statistiques des signaux. On voit clairement que ce n'est pas le cas au niveau de quelques millimètres à l'aide de la courbe rouge qui représente la série « différence » entre les deux précédentes séries. Cette série de l'effet de « moyenne par moindres carrés » montre bien qu'il peut atteindre un niveau de plusieurs millimètres (cinq millimètres, voire plus pour cet exemple). Ce n'est donc pas satisfaisant en ce qui concerne le niveau d'exactitude que l'on cherche à atteindre pour les séries temporelles de positions de stations estimées.

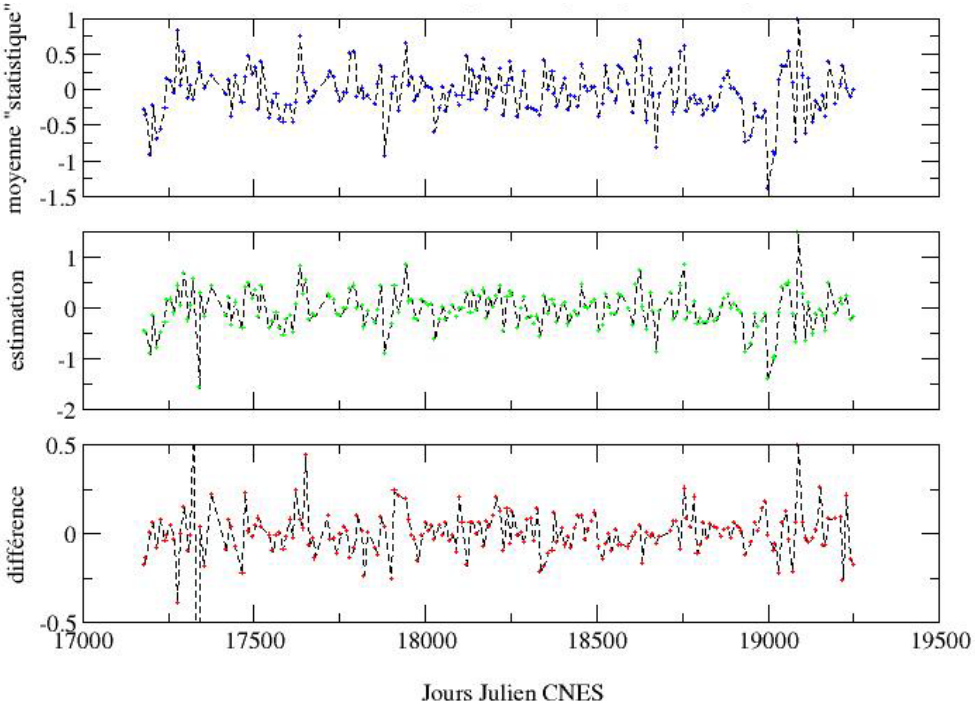


figure B.13.1

Effet de « moyenne par moindres carrés » sur la composante verticale de la station de Grasse (7 835). L'unité est le centimètre. La courbe bleue correspond aux moyennes statistiques du signal vrai tous les dix jours, la courbe verte correspond aux appoints restitués tous les dix jours et la courbe rouge est la différence entre estimation et moyenne statistique donc l'« effet de moyenne par moindres carrés ».

La figure B.13.2 (page suivante) montre les résidus de l'estimation pour les mesures du satellite LAGEOS-1. Les résidus sur un passage du satellite montrent clairement un signal résiduel et donc un défaut de la modélisation utilisée : ici, l'effet de « moyenne par moindres carrés ». Ces résidus sont en accord avec la formulation (1') de l'annexe, page 143.

Le modèle utilisé (appoints constants sur un intervalle de temps donné) n'est donc pas satisfaisant en terme d'exactitude des séries temporelles estimées. Il ne l'est pas non plus pour la mise en évidence et l'étude de signaux géo-dynamiques inconnus dans la mesure où l'on obtient des appoints reflétant des moyennes biaisées des dits signaux. Il faut donc repenser le modèle utilisé pour mieux représenter les signaux physiques contenus dans les séries temporelles de positions de stations d'observation terrestres.

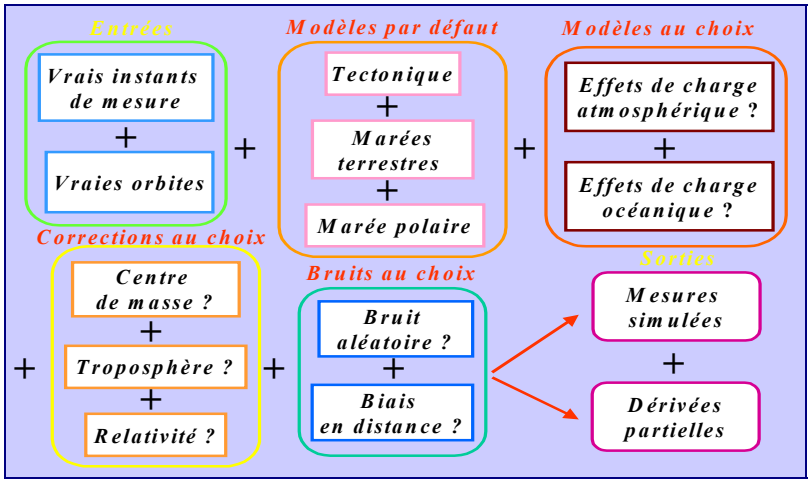


schéma B.13.1

Schéma explicatif de la création de mesures simulées

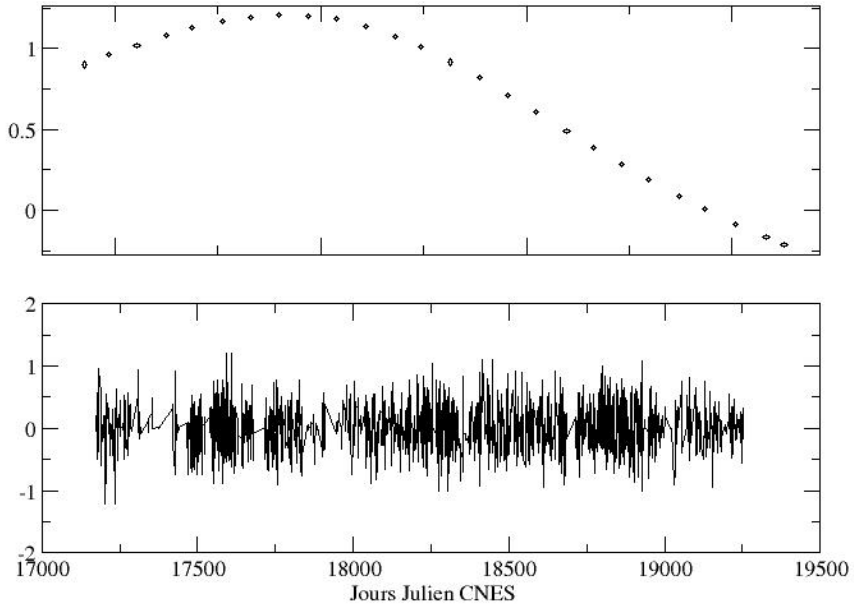


figure B.13.2

Résidus de l'estimation des appoints constants sur dix jours pour la station de Grasse (7 835) pour le satellite LAGEOS-1. L'unité est le centimètre.
En haut : résidus sur un passage. En bas : résidus sur l'ensemble de la période de traitement.

Quel modèle pour les signaux géodynamiques ?

Le problème est ici de trouver un modèle adéquat pour représenter une fonction du temps $\varphi(t)$ *a priori* inconnue que l'on veut mettre en évidence et étudier à l'aide de mesures géodésiques (on prendra encore ici l'exemple de mesures de télémétrie laser sur satellites). Cette fonction correspond aux phénomènes physiques qui sous-tendent les mouvements de la croûte terrestre donc des stations terrestres.

Nous savons grâce aux modèles physiques existants, type [GÉGOUT 03] que les phénomènes géodynamiques que nous cherchons à mettre en évidence sont principalement de nature périodique. On peut donc restituer une série périodique contenant les fréquences caractéristiques du signal physique que l'on cherche à mettre en évidence.

Modèle alternatif basé sur des séries périodiques

L'idée de ce modèle alternatif est d'estimer, non plus des séries temporelles d'appoints constants sur une période de temps donnée, mais des séries de termes périodiques (une série par composante de positionnement – Nord, Est et Verticale) en utilisant un modèle du type :

$$\varphi(t) \cong \sum_{i=1}^{n} a_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i}t\right) + b_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i}t\right) \qquad (9)$$

Les périodes $(T_i)_{i=1,n}$ sont les périodes caractéristiques du signal $\varphi(t)$. Les inconnues du problème sont donc les jeux de coefficients $(a_i)_{i=1,n}$ et $(b_i)_{i=1,n}$ pour chaque composante de positionnement. Pour estimer ces jeux de coefficients, on peut ainsi cumuler les mesures sur une longue période de temps comme c'est le cas dans la figure B.13.3, page suivante.

Les mesures utilisées pour la restitution des séries périodiques de cette figure ont été simulées à l'aide du modèle [GÉGOUT 03] en accord avec le schéma B.13.1. On voit le bon accord entre séries périodiques et modèles (donc signal physique que l'on cherche à mettre en évidence). Cet accord est relativement moins bon pour la composante Nord du positionnement. Ceci peut s'expliquer, d'une part, par le plus faible nombre de mesures de télémétrie laser à basse élévation qu'à haute élévation, mais surtout, par la faible valeur du signal géodynamique porté par cette composante (moins de un millimètre d'amplitude crête à crête).

L'avantage d'une telle approche est de ne pas imposer d'échantillonnage *a priori* sur les séries temporelles puisque l'on restitue non plus un signal discontinu mais bien un signal continu sur l'intervalle de temps considéré. On peut ainsi déterminer une série temporelle à « échantillonnage libre ». En revanche, il faut tenir compte de l'échantillonnage des mesures utilisées pour la période minimale pouvant être restituée.

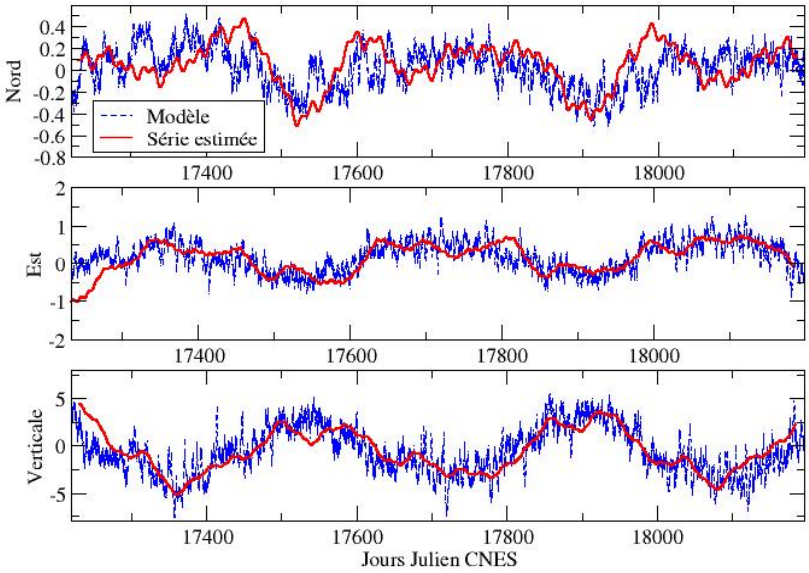


figure B.13.3

Séries périodiques estimées sur les trois composantes de positionnement de la station de Yarragadee (7 090). L'unité est le millimètre.

Les courbes bleues correspondent aux modèles utilisés pour simuler les mesures, les courbes rouges aux séries périodiques restituées.

On peut en effet difficilement imaginer restituer un signal périodique de période inférieure au minimum des écarts temporels entre deux mesures successives. Ainsi, les séries périodiques restituées ne pourront pas contenir les plus petites périodes des signaux physiques qu'elles représentent (à moins de disposer de mesures très rapprochées dans le temps).

De plus, ce modèle suppose la connaissance des périodes caractéristiques des signaux physiques que l'on veut mettre en évidence. On peut constater avec la transformée en ondelettes de la figure B.13.4, ci-dessous, que ces termes périodiques sont variables (en fréquence ou en amplitude) pour les effets de charge atmosphérique. En effet, ces signaux géodynamiques présentent des inter-annualités.

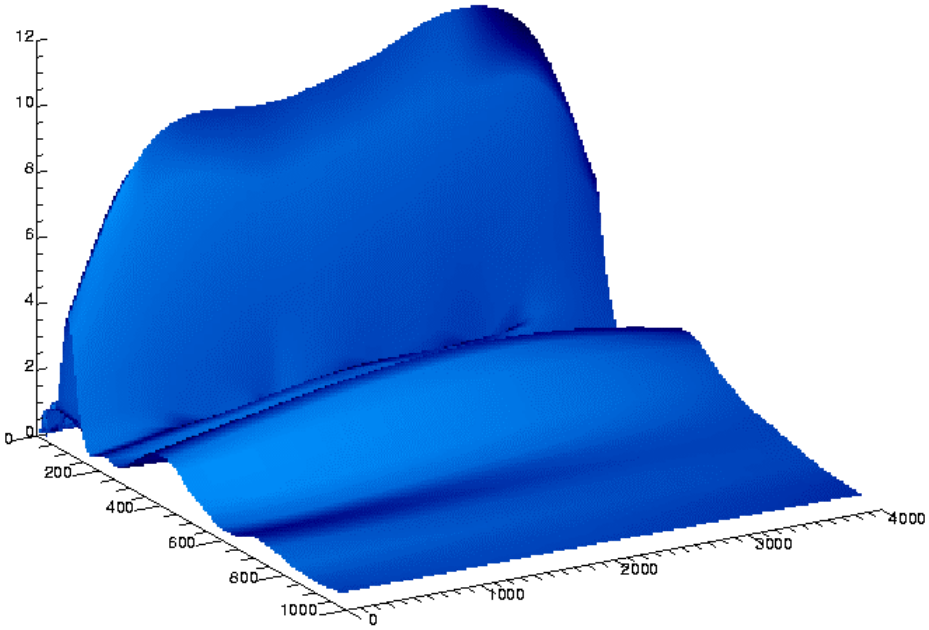


figure B.13.4

Transformée en ondelettes (ondelettes dites du « chapeau mexicain » (voir annexe, page 145) du modèle d'effet de charge atmosphérique [GÉGOUT 03] pour la composante verticale de la station de Yarragadee (7 090).

En abscisse : le temps, en ordonnée les périodes en jours. On voit clairement deux périodes se détacher : une période à six mois et une période annuelle.

On peut également voir que les énergies liées à ces deux périodes varient au cours du temps et que la courbe attachée à la période annuelle est étalée dans le domaine fréquentiel.

Ces dernières peuvent poser des problèmes pour la restitution des séries périodiques. Et, enfin, rappelant que les séries temporelles de positions de stations doivent certes permettre de mettre en évidence des phénomènes plus ou moins bien connus mais surtout des phénomènes inconnus, on voit les limites de cette modélisation qui impose *a priori* une forme périodique au signal physique recherché.

Nous avons simulé un signal résiduel fictif pouvant représenter un signal physique porté par une composante de positionnement d'une station d'observation terrestre. Ce signal simulé est représenté figure B.13.5, ci-dessous). Il comporte un terme constant, un terme linéaire, un saut (simulant un séisme), trois termes périodiques (de périodes respectives 5, 86 et 227) ainsi qu'un terme périodique « variable » (la période varie de 300 à 310) simulant une inter-annualité.

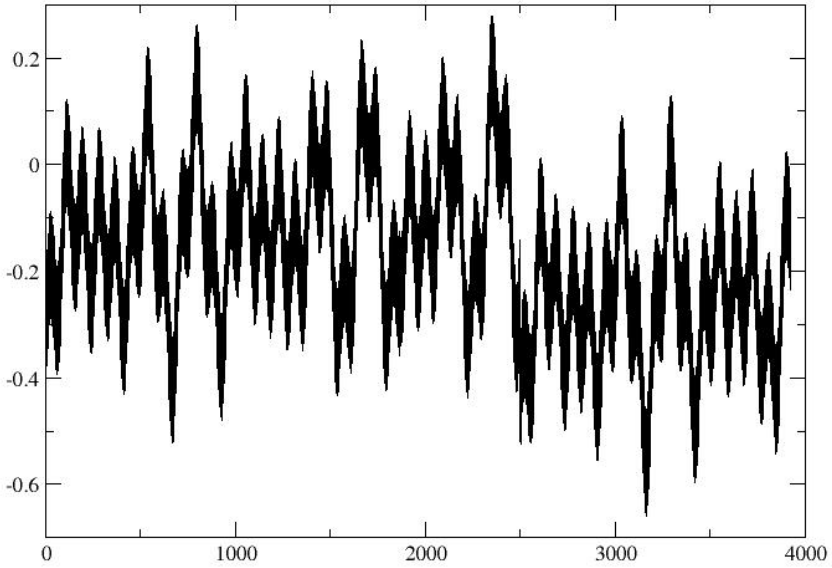


figure B.13.5

Signal simulé sur une composante de positionnement d'une station d'observation terrestre.
Les unités sont arbitraires.

Ce signal comporte un biais, une dérive, un séisme, des termes périodiques purs et une inter-annualité.

À partir de ce signal résiduel simulé, nous avons restitué une série de termes périodiques comportant cinq périodes : les trois périodes des signaux purement sinusoïdaux (5, 86 et 227), la période de 300 ainsi qu'une très longue période (10 000) destinée à absorber les termes linéaires du signal. Le résultat de cette estimation est montré figure B.13.6

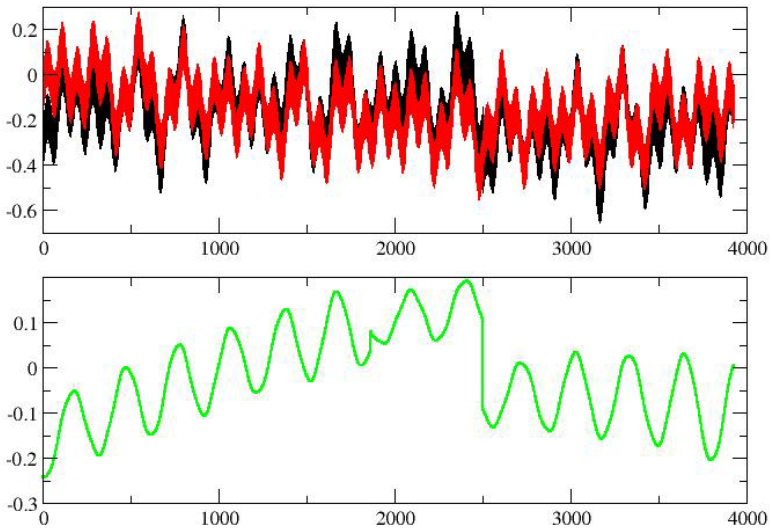


figure B.13.6

Restitution d'une série de termes périodiques à partir du signal physique simulé. Les unités sont arbitraires.
En noir : le signal simulé. En rouge : la série de termes périodiques restituée.
En vert : la différence (moyenne = - 0,019 ; écart-type = 0,103).

On voit très clairement sur la figure B.13.6 que la série périodique ne parvient pas à absorber complètement le séisme et surtout le changement de période (l'inter-annualité à 300). Or, on peut parfaitement imaginer devoir mettre en évidence un tel signal physique à l'aide des séries temporelles de positions de stations terrestres.

Il faut donc revoir le modèle alternatif et concevoir un modèle qui puisse représenter au mieux un signal physique présentant des singularités ainsi que des variations fréquentielles. Clairement, il faut un modèle qui prenne en compte le signal physique dans l'espace « temps-fréquence » et non pas uniquement suivant la seule dimension fréquentielle. La théorie des ondelettes peut nous fournir une telle représentation.

Modèle alternatif basé sur des ondelettes

L'idée de ce modèle alternatif est d'estimer directement les décompositions sur des bases d'ondelettes de Haar des signaux physiques portés par les composantes de positionnement des stations d'observation terrestres. Les signaux physiques sont donc maintenant représentés sous la forme suivante (Cf. équation (3') de l'annexe, page 144).

$$\varphi(t) = \sum_{j=-j_1}^{j_2} \sum_{n=0}^{n_{\max}} a_{j,n}\psi_{j,n}(t) \quad \text{où} \quad n_{max} = \begin{cases} 2^j - 1 \text{ si } j < 0 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} \qquad (10)$$

Les inconnues du problème sont donc les jeux de coefficients ($a_{j,n}$) pour chaque composante de positionnement. Reprenant le signal simulé précédent (figure B.13.5), on estime maintenant une décomposition sur une base d'ondelettes de Haar selon (10) pour onze échelles différentes (l'indice j variant de - 9, soit un intervalle de 7,67, à + 1, soit un intervalle de 7 851,5). Le résultat est présenté figure B.13.7, ci-dessous. Il montre clairement un meilleur accord entre signaux simulé et restitué que pour la série de termes périodiques figure B.13.6.

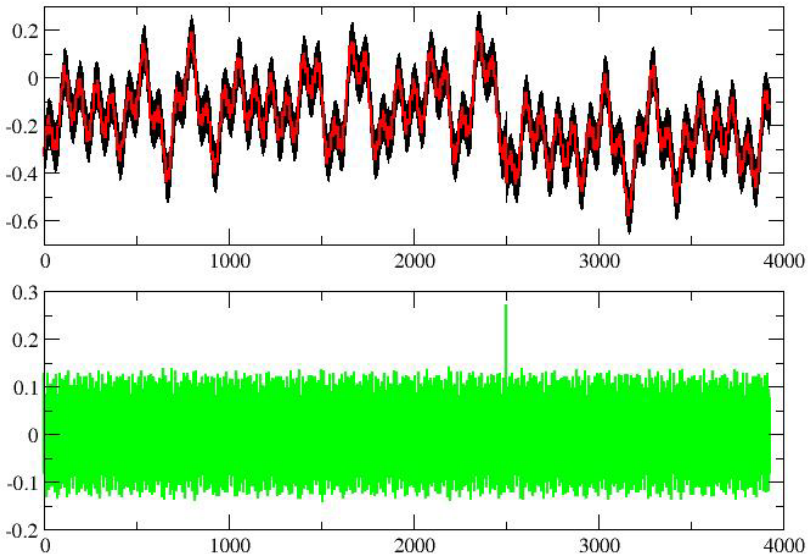


figure B.13.7

Restitution d'une décomposition sur une base d'ondelettes de Haar à partir du signal physique simulé.
Les unités sont arbitraires.
En noir : le signal simulé. En rouge : la décomposition restituée.
En vert : la différence (moyenne = - 0,834.10^{-7} ; écart-type = 0,068).

Les zooms de la figure B.13.8 (page suivante) montrent eux l'importance du bon choix des échelles de restitution pour la décomposition sur la base d'ondelettes. En effet, le signal de période 5 n'a pas été restitué.

La restitution de ce modèle à partir de mesures simulées suivant le schéma B.13.1 (page 136) avec [GÉGOUT 03] donne les résultats de la figure B.13.9 (page suivante). Dans ce cas, la restitution a été effectuée avec six échelles différentes (l'indice j variant de - 4, soit un intervalle de 59,5 jours, à + 1, soit un intervalle de 1 904 jours).

Les résultats de la figure B.13.9 sont très satisfaisants. Mais on retrouve le moins bon accord pour les composantes horizontales de la position de la station et il faut également préciser que les échelles inférieures à - 4 n'ont pu être restituées du fait de « trous de mesure ». Pour ce modèle alternatif, l'échantillonnage des mesures est donc également un facteur limitant.

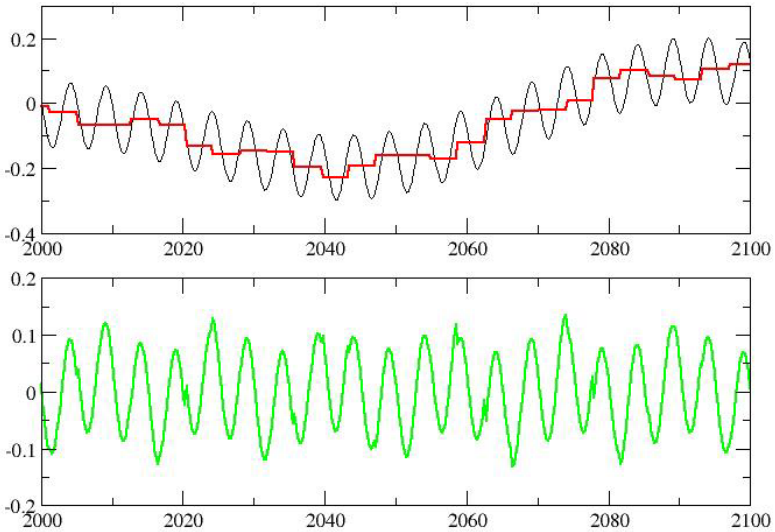


figure B.13.8 *: zoom sur les signaux de la figure B.13.7*

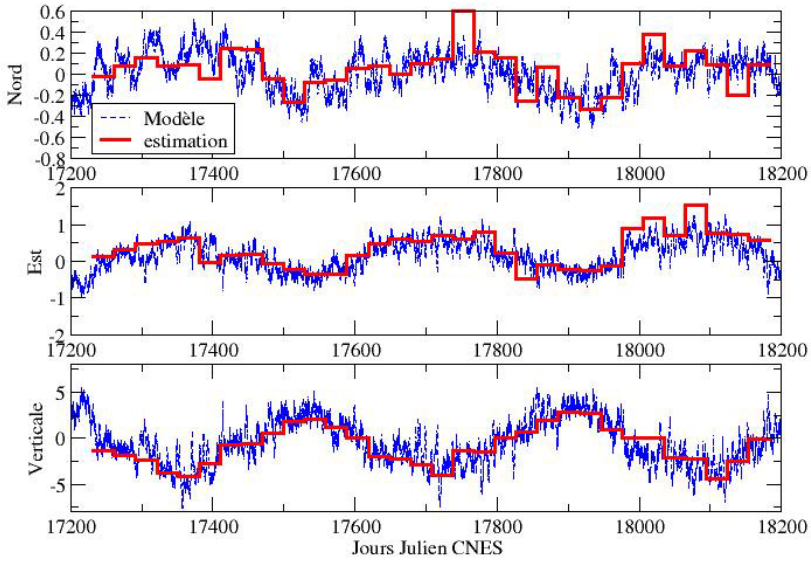


figure B.13.9

Décompositions sur des bases d'ondelettes de Haar estimées sur les trois composantes de positionnement de la station de Yarragadee (7 090). L'unité est le millimètre.

Les courbes bleues correspondent aux modèles utilisés, les courbes rouges aux décompositions restituées.

Conclusions et perspectives

L'effet de « moyenne par moindres carrés » est un défaut de modélisation source d'inexactitude pour la restitution de séries temporelles géodésiques par la méthode des moindres carrés. Il faut donc en tenir compte.

Le modèle alternatif reposant sur la décomposition des signaux physiques sur des bases d'ondelettes de Haar paraît être une piste intéressante pour pallier cet effet de « moyenne » et, tout simplement, pour restituer de façon « continue » des signaux géodynamiques contenus dans les mesures. Concernant plus particulièrement les séries temporelles de positions de stations laser, les résultats des figures B.13.8 et B.13.9 appellent plusieurs remarques. Tout d'abord, la décomposition du signal physique étudié doit être optimisée tant suivant l'axe temporel que l'axe fréquentiel. Il existe d'ailleurs des approches de la théorie des ondelettes (type cosinus locaux ou paquets d'ondelettes) qui permettent de paver l'espace temps-fréquence sans limite [MALLAT 00] comme le montrent les schémas B.13.2 et B.13.3, ci-dessous. Le schéma B.13.3 montre que l'investigation vers des bases type « cosinus locaux » permettrait de pallier la limitation des échelles pouvant être restituées par l'échantillonnage des mesures.

On peut également envisager des approches permettant de décomposer les signaux physiques sur un nombre restreint de vecteurs de base, optimisant ainsi la représentation de ces signaux. À ce propos, et à condition de travailler dans des bases d'ondelettes orthogonalisées pour le produit scalaire discret donné par l'échantillonnage des mesures ($\langle f,g \rangle = \sum_{i=1}^{m} f(t_i).g(t_i)$), on peut également envisager d'estimer les coefficients sur les ondelettes échelle par échelle.

Enfin, concernant l'estimation de telles décompositions pour les trois composantes de positionnement, on peut douter de la pertinence de telles estimations pour les composantes horizontales pour la télémétrie laser (meilleure technique pour la détermination de la composante verticale du positionnement) même si les résultats de la figure B.13.9 sont satisfaisants.

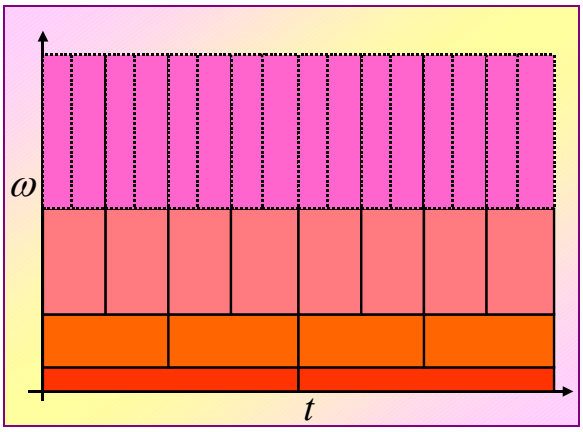


schéma B.13.2 *: pavage temps-fréquence par des ondelettes de Haar*

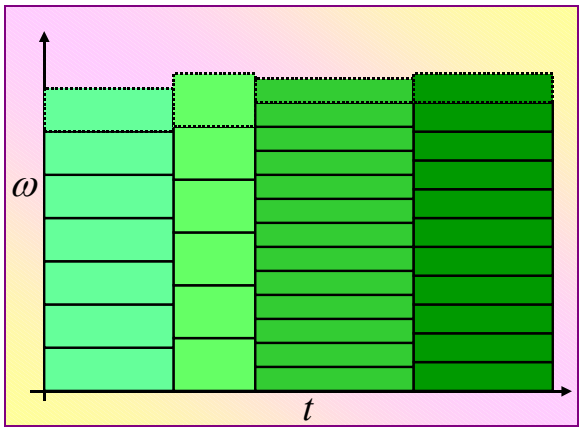


schéma B.13.3 *: pavage temps-fréquence par des cosinus locaux d'après* [MALLAT 00]

Annexes

Effet de « moyenne par moindres carrés » : compléments théoriques

Les notations de cette partie sont les mêmes que celles de la première partie de cet article.

Résidus de l'estimation par moindres carrés

Rappelant que le vecteur $\hat{\vec{V}}$ des résidus de l'estimation par moindres carrés est donné par la relation :

$\hat{\vec{V}} = A.\delta\hat{\vec{X}} - \vec{Y}$, la relation (8) donne :

$$\hat{\vec{V}} = A.\delta\vec{X}_{moyen} + A(A^T PA)^{-1} A^T P\widetilde{A}.\delta\widetilde{\vec{X}} - A(A^T PA)^{-1} A^T P\widetilde{A}.\delta\widetilde{\vec{X}}_{moyen} - \vec{Y} \ .$$

Comme $\widetilde{A}.\delta\widetilde{\vec{X}}_{moyen} = A.\delta\vec{X}_{moyen}$, on obtient :

$$\hat{\vec{V}} = A(A^T PA)^{-1} A^T P\widetilde{A}.\delta\widetilde{\vec{X}} - \vec{Y}$$

et finalement, au premier ordre, en injectant l'équation (6) dans la précédente relation, on obtient :

$$\hat{\vec{V}} = [A(A^T PA)^{-1} A^T P - I]\widetilde{A}.\delta\widetilde{\vec{X}} \qquad (1')$$

Au passage, on peut remarquer que si les appoints $\delta\vec{X}$ étaient véritablement constants sur l'intervalle de temps $[t_1, t_m]$, les résidus de l'estimation seraient nuls au premier ordre.

Généralisation pour des paramètres de différents types

Supposons maintenant que la fonction modèle f ait la forme suivante :

$$m(t) = f(t, \vec{X}(t), \vec{Z}) \ .$$

Le vecteur $\vec{X}$ désigne toujours les paramètres physiques d'intérêt dont les appoints par rapport à un modèle initial donné sont toujours supposés constant dans la modélisation pour la compensation par moindres carrés.

Les paramètres $\vec{Z}$ sont eux des paramètres véritablement constants du modèle (par exemple, des biais en distance de stations de télémétrie laser) dont on connaît une valeur approchée $\vec{Z}_0$.

La linéarisation de la fonction f donne dans ce cas :

$$m(t) \cong f(t, \vec{X}_0(t), \vec{Z}_0) + \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t, \vec{X}_0(t), \vec{Z}_0).\delta\vec{X} + \frac{\partial f}{\partial \vec{Z}}(t, \vec{X}_0(t), \vec{Z}_0).\delta\vec{Z} \ .$$

La linéarisation de la mesure physique $m(t)$ donne quant à elle :

$$m(t) \cong f\,(t, \vec{X}_0(t), \vec{Z}_0) + \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t, \vec{X}_0(t), \vec{Z}_0).\delta\vec{X}(t) + \frac{\partial f}{\partial \vec{Z}}(t, \vec{X}_0(t), \vec{Z}_0).\delta\vec{Z} \ .$$

Sous forme matricielle, le système d'observations peut donc s'écrire :

$$\vec{Y} \cong \left[A_X A_Z\right].\begin{pmatrix} \delta\vec{X} \\ \delta\vec{Z} \end{pmatrix}$$

où :

$$\vec{Y} = \begin{pmatrix} m(t_1) - f(t_1, \vec{X}_0(t_1), \vec{Z}_0) \\ m(t_2) - f(t_2, \vec{X}_0(t_2), \vec{Z}_0) \\ \vdots \\ m(t_m) - f(t_m, \vec{X}_0(t_m), \vec{Z}_0) \end{pmatrix}, \ A_X = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_1, \vec{X}_0(t_1), \vec{Z}_0) \\ \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_2, \vec{X}_0(t_2), \vec{Z}_0) \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_m, \vec{X}_0(t_m), \vec{Z}_0) \end{bmatrix} \text{ et } A_Z = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \vec{Z}}(t_1, \vec{X}_0(t_1), \vec{Z}_0) \\ \frac{\partial f}{\partial \vec{Z}}(t_2, \vec{X}_0(t_2), \vec{Z}_0) \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial \vec{Z}}(t_m, \vec{X}_0(t_m), \vec{Z}_0) \end{bmatrix}$$

Prenant en compte la linéarisation de la mesure, on peut aussi écrire :

$$\vec{Y} \cong \left[\widetilde{A}_X A_Z\right].\begin{pmatrix} \delta\widetilde{\vec{X}} \\ \delta\vec{Z} \end{pmatrix}$$

avec :

$$\widetilde{A}_X = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_1, \vec{X}_0(t_1), \vec{Z}_0) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_2, \vec{X}_0(t_2), \vec{Z}_0) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{\partial f}{\partial \vec{X}}(t_m, \vec{X}_0(t_m), \vec{Z}_0) \end{bmatrix}$$

Notant N la matrice normale du système de compensation par moindres carrés, on obtient les estimations :

$$\begin{pmatrix} \delta\hat{\vec{X}} \\ \delta\hat{\vec{Z}} \end{pmatrix} = N^{-1}\vec{Y} \cong N^{-1}\begin{pmatrix} A_X^T P\widetilde{A}_X.\delta\widetilde{\vec{X}} + A_X^T P A_Z \vec{Z} \\ A_Z^T P\widetilde{A}_X.\delta\widetilde{\vec{X}} + A_Z^T P A_Z \vec{Z} \end{pmatrix}$$

et, finalement, en remplaçant $\delta\widetilde{\vec{X}}$ par $(\delta\widetilde{\vec{X}} - \delta\widetilde{\vec{X}}_{moyen}) + \delta\widetilde{\vec{X}}_{moyen}$:

$$\begin{pmatrix} \delta\hat{\vec{X}} \\ \delta\hat{\vec{Z}} \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} \delta\vec{X}_{moyen} \\ \delta\vec{Z} \end{pmatrix} + N^{-1}\begin{bmatrix} A_X^T P\widetilde{A}_X \\ A_Z^T P\widetilde{A}_X \end{bmatrix}.(\delta\widetilde{\vec{X}} - \delta\widetilde{\vec{X}}_{moyen}) \qquad (2')$$

Ainsi l'effet de « moyenne par moindres carrés » affecte non seulement les appoints sur les paramètres $\vec{X}$ variant dans le temps mais peut également affecter les paramètres constants $\vec{Z}$.

Quelques notions sur les ondelettes

Dans cette partie, nous rappelons quelques notions de base sur la théorie des ondelettes. Le lecteur intéressé peut se reporter à [MALLAT 00] pour plus de détails.

Une ondelette est une fonction ψ de $L^2(\Re)$, ensemble des fonctions définies et mesurables sur $\Re$ dont le module au carré est intégrable soit $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt < \infty$ au sens de l'intégration de Lebesgue, de moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)\,dt = 0$$

ψ est de norme unitaire et centrée en 0. A partir de cette fonction, on définit, par dilatations et translations, une famille de fonctions $(\psi_{j,n})_{(j,n)\in Z^2}$ constituant une base ortho-normale de $L^2(\Re)$ par :

$$\psi_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}}\psi\left(\frac{t - 2^j n}{2^j}\right)$$

Toute fonction f de $L^2(\Re)$ peut alors se décomposer sur cette base sous la forme :

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty}\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\langle f, \psi_{j,n} \right\rangle \psi_{j,n}(t) \text{ avec } \left\langle f, \psi_{j,n} \right\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u)\psi_{j,n}(u)\,du \qquad (3')$$

$\left\langle f, \psi_{j,n} \right\rangle$ est la transformée en ondelettes de f au temps $2^j n$ et à l'échelle 2^j .

L'avantage d'une base d'ondelettes par rapport à une base de Fourier est de pouvoir analyser des signaux suivant les deux dimensions « temps-fréquence » et non suivant la seule dimension « fréquence ».

Parmi les ondelettes les plus connues, on peut citer l'ondelette de Haar dont la fonction noyau est définie par :

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 \text{ pour } 0 \le t < \frac{1}{2} \\ -1 \text{ pour } \frac{1}{2} \le t < 1 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} \qquad (4')$$

ainsi que l'ondelette dite du chapeau mexicain dont la fonction noyau est définie par double dérivation d'une gaussienne :

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{-\frac{1}{4}}(t^2 - 1)\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right).$$

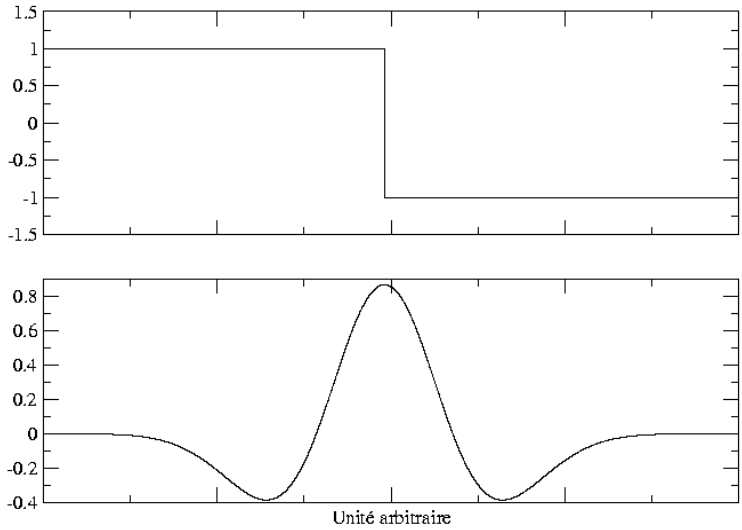


figure B.13.10

Fonctions noyaux des ondelettes de Haar (en haut) et du chapeau mexicain (en bas).

Références

[AGNEW 92] D.C. Agnew : *The time-domain behaviour of power-law noises,* in Journal of Geophysical Research, vol. 19, n°4, pp.°333-336, 1992.

[DAVIES, BLEWITT 00] P. Davies and G. Blewitt : *Methodology for global geodetic time series estimation : a new tool for geodynamics,* in Journal of Geophysical Research, vol.°105, n°B5, pp.°11083-11100, 2000.

[DELEFLIE 02] F. Deleflie : *Théorie semi-analytique de mouvements quasi-circulaires moyens en mécanique spatiale. Applications aux satellites géodésiques,* thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, soutenue le 18 décembre 2002.

[GÉGOUT 03] P. Gégout : *Communication personnelle : Modèle d'effets de charge atmosphérique* pascal.gegout@eost.u-strasbg 2003.

[IERS 04a] Site Internet : http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/ 2004.

[IERS 04b] Site Internet : http://www.iers.org/iers/about/wg/wg3/cf.p_cpp.html 2004.

[LANGBEIN, JOHNSON 97] J. Langbein and H. Johnson : *Correlated errors in geodetic time series : implications for time-dependent deformation,* in Journal of Geophysical Research, vol.°102, n°B1, pp.°591-603, 1997.

[MALLAT 00] S. Mallat : *Une exploration des signaux en ondelettes,* Éditions de l'École Polytechnique, France, novembre 2000.

[MAO et al 99] A. Mao, C.G. Harrison and T.H. Dixon : *Noise in GPS coordinates time series,* in Journal of Geophysical Research, vol.°104, n°B2, pp.°2797-2816, 1999.

[MC CARTHY 96] D.D. Mc Carthy : *IERS Conventions.* IERS technical note 21, Observatoire de Paris, 1996.

[NICOLAS 00] J. Nicolas : *La station Laser Ultra Mobile. De l'obtention d'une exactitude centimétrique des mesures à des applications en océanographie et géodésie spatiales,* thèse de doctorat de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis, soutenue le 7 décembre 2000.

Publications

[ALTAMIMI et al 02] Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher : *ITRF2000 : a new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science applications,* in Journal of Geophysical Research, vol.°107, n°B10, pp.°2214-, doi : 2210, 1029/2001BJ000561, IGN, ENSG-laboratoire LAREG, 2002.

[COULOT et al 02] D. Coulot, J. Nicolas & P. Exertier : *Contribution de la télémétrie laser à la nouvelle représentation du système de référence terrestre international et à la géodynamique*, in Bulletin d'information de l'IGN, n°73, activité recherche 2001, mars 2002/3, pp. 89-98, IGN, ENSG-laboratoire LAREG, 2002.

[SILLARD 01a] P. Sillard : *Un exemple de traitement de séries temporelles de positions d'instrument géodésique,* in Bulletin d'Information de l'IGN, n°72, activité recherche 2000, mars 2001/3, pp. 115-130, IGN, ENSG-laboratoire LAREG, IGN-SR-00-001/R-ART-PS, 2001.

[SILLARD 01b] P. Sillard : *Estimation par moindres carrés,* Collection IGN, ENSG-laboratoire LAREG, Hermès Éditeur, Lavoisier, 2001.

C. Publications

Isabelle Melot

La liste suivante présente les références des publications issues du programme de recherche 2003. Elle reprend les références données dans les différents articles de ce 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-MANDÉ 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

Thèses de doctorat

[GUIGUES 03a] L. Guigues : *Méthodes multi-échelles pour la segmentation d'images*, thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, spécialité : Traitement des images et du signal, directeur de thèse : Jean-Pierre Cocquerez, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-037-C-THE-LG, soutenue le 12 décembre 2003.

[HUBERT 03] Frédéric Hubert : *Modèle de traduction d'un besoin d'utilisateur pour la dérivation de données géographiques et leur symbolisation* via *le Web*, thèse de doctorat de l'Université de Caen, Paris, spécialité : Informatique, directrice de thèse : Anne Nicolle, disponible sur le site : ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-042-S-THE-FH, soutenue le 7 juillet 2003.

[RAMOS 03] Fabien Ramos : *Modélisation et validation d'un Système d'Information Géographique 3D opérationnel*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité : Système d'Information Géographique, directeur de thèse : Bernard Cervelle, disponible sur le site : ftp://ftp.ign.fr/ign/COGIT/THESES/, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-041-S-THE-FR, soutenue le 5 mai 2003.

[SAMMUNEH 03] Muhammad Ali Sammuneh : *Contribution au positionnement en temps réel par GPS. Prédiction de la correction ionosphérique*, thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, spécialité : Astro-géodésie, directrice de thèse : Martine Feissel-Vernier, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-0045-G-MAS, soutenue le 15 décembre 2003.

[WILLIS 03] P. Willis : *DORIS et la géodésie globale*, document de synthèse pour une habilitation à diriger des recherches, Université Paris-6, 98 pages, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-077-G-RAP-PW, soutenue le 25 novembre 2003.

Rapports de mi-thèse (doctorats)

[BENTRAH 03] O. Bentrah *: Estimation de la trajectographie d'un vecteur à partir d'une séquence d'images stéréoscopiques,* rapport d'avancement de 1ère année de thèse, IGN-INRIA, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-002-C-RAP-OB, 2 octobre 2003.

[SHEEREN 03] D. Sheeren : *Interprétation des différences de représentation d'un même phénomène géographique,* rapport intermédiaire de thèse, LIP6, Université P. & M. Curie (Paris-6), 87 pages + annexes, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-009-S-RAP-DS, 2003.

Articles (journaux scientifiques)

[ALTAMIMI et al 03] Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher : *The impact of a No-Net-Rotation Condition on ITRF2000,*\grl, 30 (2), 1064, doi :10.1029/2002GL016279, article soumis à comité de lecture, IGN, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-018-G-ART-ZA, 2003.

[BADARD, BRAUN 03] T. Badard & A. Braun : *OXYGENE - D'une plate-forme inter-opérable au déploiement de services Web géographiques,* in Revue Internationale de Géomatique, Hermès Sciences, Éditeur : Lavoisier, Paris (F), 22 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-011-S-ART-TB, 2003.

[BOCK, BOUIN 03] O. Bock and M.-N. Bouin : *Sensitivity of Zenith tropospheric Delay Estimates to GPS data analysis procedure,* in JGR, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-023-G-ART-OB, 2003.

[BOFFET 03] A. Boffet : *Généralisation cartographique et description des espaces urbains*, in Bulletin n°2 de l'AGF-BAGF-6 Géographies, 2003/2, pp. 207-218, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-043-S-ART-AB, 2003.

[BOUIN et al 03] C. Vigny, A. Socquet, C. Rangin, N. Chamot-Rooke, M. Pubellier, M.-N. Bouin, G. Bertrand and M. Becker : *Present day crustal deformation around Sagaing fault, Myanmar,* in Journal Geophysic Research, 108, B11, pp. 2533, article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-020-G-ART-MNB, 2003.

[BOUIN et al 03] C. Champollion, F. Masson, M.-N. Bouin, A. Walpersdorf, E. Doerflinger, O. Bock and J. Van Baelen : *GPS Water Vapour Tomography : First results from the ESCOMPTE Field Experiment*, in Atmospheric Res., laboratoire LAREG, IGN-SR-03-021-ART-MNB, 2003.

[BOUIN et al 03] G. Wöppelmann, M.-N. Bouin, Z. Altamimi, L. Daniel and S. McLellan : *Current GPS data analysis at CLDG for the IGS TIGA Pilot Project,* in Cahiers du Centre Européen de Géodynamique, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-022-G-ART-GW, 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *Selecting stable extragalactic compact radio sources from the permanent astrogeodetic VLBI program,* A&A 403, 105, article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-024-G-ART-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER et al 03] V. Dehant, M. Feissel-Vernier, O. de Viron, C. Ma, M. Yseboodt and C. Bizouard : *Remaining error sources in the nutation at the sub-milliarcsecond level,* in JGRB, 108, 2275, article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-035-G-ART-MFV, 2003.

[JAMET, DIAMENT 03] O. Jamet and M. Diament : *On the estimation of local spectral representations of gravity anomalies,* in Proceedings Analitical Representation of potential Field Anomalies for Europe (AROPA'03), in Cahiers du Centre Européen Géodynamique & de Sismologie vol. 20, pp. 71-77, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-002-G-ART-OJ, 2003.

[PAPARODITIS 03] N. Paparoditis : *Modélisation 3D des environnements urbains*, in revue Géomètre, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-010-C-ART-NP, 2003.

[ROUSSEAUX 03] F. Rousseaux : *Étude de la représentation du relief sur les application*, in Revue internationale de Géomatique, n°4/2003, Hermès Sciences, Éditeur : Lavoisier, Paris, France, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-050-S-ART-FR, 2003.

[RUAS, HOLZAPFEL 04] A. Ruas & F. Holzapfel : *Utilisation de connaissance d'experts pour l'automatisation de la caractérisation des alignements de bâtiments*, in Le Monde des Cartes n°179, 21ème Conférence cartographique internationale, Durban, pp. 27-37, laboratoire COGIT, IGN-SR-04-004-S-ART-AR, 2004.

[SHEEREN 04] D. Sheeren : *Apprentissage de concepts pour l'aide à l'interprétation des différences de représentation d'un même phénomène géographique,* in Bulletin du Comité Français de Cartographie (CFC), n°179, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-013-S-ART-DS, 2003.

[THOM, BOCK 03] Ch. Thom & O. Bock : *Rendre possible le nivellement par GPS,* in Recherche Équipement, Éditeur : DRAST, France, n°1, page 18, juillet 2003, laboratoire OEMI, IGN-SR-03-002-O-ART-CT, 2003.

[WILLIS 03] P. Willis : *How to Process DORIS data with the Gipsy/Oasis software, Gipsy release,* laboratoire LAREG, IGN-SR-03-044-G-ART-PW, septembre 2003.

[WILLIS 03] P. Willis : *Book review, The Man who flattened the Earth by Mary Terrall,* IAG Newsletter, in Journal Geod., Springer-Verlag, 77, 7-8, pp. 490-491, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-051-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS 03] P. Willis : *Livres, The Man who Flattened the Earth by Mary Terrall*, in Revue XYZ, 96, 25, 3, page 76, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-052-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS 03] P. Willis : *41ème réunion du CGSIC* (Comité d'Interface Civil GPS), Arlington (USA), 19-20 mars 2003, in Revue XYZ, 95, pp. 25-26, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-082-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] 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 Journal Inst. Navigation, 50, 3, pp. 171-179, article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-044-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] B.J. Haines, Y. Bar-Sever, W. Bertiger, S. Desai and P. Willis : *JASON-1 and the BlackJack receiver, new strategies for the 1-cm precise Orbit determination,* in Mar. Geod., article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-045-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] 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,* in Adv. Space Res., 31, 8, pp. 1941-1946, article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-046-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] P. Willis, Y Bar-Sever and G. Tavernier : *DORIS as a potential part of a Global Geodetic Observing System*, in Journal Geodyn., article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-048-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] P. Willis, B. Haines, J.-P. Berthias, P. Sengenes & J.-L. Le Mouël : *Comportement de l'oscillateur DORIS/JASON au passage de l'anomalie sud-atlantique,* in CR Acad. Sciences, Elsevier Éditeur (France), article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-049-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] 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,* in IERS Technical Note 30, juillet 2003, pp. 32-34, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-053-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS, HEFLIN 03] P. Willis and M. Heflin : *External Validation of the GRACE GGM01C Gravity Field using GPS and DORIS positioning Results*, in Geophys. Res. Letter, article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-050-G-ART-PW, 2003.

[WILLIS, TAVERNIER 03] G. Tavernier and P. Willis : *The International DORIS Service,* in Geodesist's Handbook, Springer-Verlag, disponible sur le site : www.gfy.ku.dk/~iag/HB2004/summary.html, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-043-G-ART-PW, 2003.

Articles parus dans ce Bulletin

Ces articles sont disponibles depuis mars 2005 sous forme numérique à l'adresse : http://recherche.ign.fr/publications.htm

[BORDIN 03] P. Bordin : *Analyse d'évolutions topographiques élémentaires pour le suivi de phénomènes géographiques,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, Activité recherche 2003, pp. 86-93, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-053-S-ART-PB, 2005.

[CHEHATA 03] N. Chehata : *Détection et reconstruction de facettes 3-D par approche hiérarchique par régions, à partir de couples d'images satellite THR,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, Activité recherche 2003, pp. 29-40, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-030-C-ART-NC, 2005.

[COULOT, BÉRIO 03] D. Coulot & Ph. Bério : *Effet de moyenne par moindres carrés, application à l'analyse des séries temporelles laser,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, Activité recherche 2003, pp. 132-145, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-083-G-ART-DC, 2005.

[GESBERT 03] N. Gesbert : *Formalisation des spécifications des bases de données géographiques,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, Activité recherche 2003, pp. 80-85, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-052-S-ART-NG, 2005.

[GUIGUES et al 03] *Segmentation multi-échelles d'images et applications*, in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, Activité recherche 2003, pp. 41-57, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-010-C-ART-LG, 2005.

[LE BAIL 03] K. Le Bail : *Évaluation de la qualité des séries temporelles de mesures en géodésie spatiale,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, Activité recherche 2003, pp. 122-131, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-085-G-ART-KLB, 2005.

[MARTIN 03] O. Martin : *Mesure de la déviation de la verticale par une méthode automatique combinant astronomie et GPS,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, activité recherche 2003, pp. 58-69, laboratoire OEMI, IGN-SR-03-010-O-ART-OM, 2005.

[MARTINOTY 03] G. Martinoty : *Effets radiométriques en milieu urbain à grande échelle et correction des ombres,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, activité recherche 2003, pp. 11-21, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-006-C-ART-GM, 2005.

[PANET et al 03] I. Panet, O. Jamet & M. Diament : *Représentation du champ de pesanteur sur des repères d'ondelettes sphériques,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, activité recherche 2003, pp. 114-121, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-084-G-ART-IP, 2005.

[PAPARODITIS et al 03] N. Paparoditis, O. Bentrah, M. Deveau & L. Pénard *: Modélisation 3D automatique terrestre d'environnements urbains et complexes à très grande échelle,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, activité recherche 2003, pp. 21-28, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-028-C-ART-NP, 2005.

[ROUSSEAUX 03] F. Rousseaux : *Caractérisation de zones d'erreurs récurrentes sur plusieurs types de MNT,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, activité recherche 2003, pp. 94-99, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-054-S-ART-FR, 2005.

[SHEEREN 03] D. Sheeren : *Étude de la cohérence inter-représentations, vers une meilleure intégration des bases de données spatiales,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, activité recherche 2003, pp. 70-79, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-051-S- ART-DS, 2005.

[TRÉVISAN 03] J. Trévisan : *Outils et méthodes de généralisation du bâti pour la fabrication des cartes au 1 : 25 000* et *au 1 : 50 000,* in Bulletin d'Information Scientifique & Technique de l'IGN n°75, activité recherche 2003, pp. 100-113, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-052-S-ART-JT, 2005.

Communications à congrès

[AIRAULT et al 03] S. Airault, Ph. Gigord, L.. Cunin, E. Breton, A. Bouillon, R. Gachet & M. Bernard : *Reference 3D Location Performance : Rewiew and Prospects,* ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space, October 6-8, Hanover (D), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-025-C-COM-SA, 2003.

[ALTAMIMI et al 03] Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher : *ITRF2000 : From Theory to Implementation,* in Proceedings of IAG V Hotine Marussi Symposium, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-019-G-COM-ZA 2003.

[ALTAMIMI et al 03] Z. Altamimi, G. Wöppelmann and M.-N. Bouin : *GPS Time Series and Reference Frame Issues,* Workshop on New technical Developments in Sea and Land Level observing Systems, UNESCO, Paris (France), 14-16 octobre 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-032-G-COM-ZA, 2003.

[ALTAMIMI et al 03] Z. Altamimi, C. Boucher and P. Willis : *Terrestrial Reference Frame Requirements within IGGOS*, UGGI General Assembly 2003, communication soumise à comité de lecture, Sapporo (Japon), juillet 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-067-G-COM-ZA, 2003.

[BADARD, BRAUN 03] T. Badard and A. Braun : *OXYGENE : An open framework for the deployment of geographic Web services,* in Actes de la 21ème Conférence internationale de cartographie (ACI/ICA), pp. 994-1004, Durban (Afrique du Sud), 10-16 août 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-015-S-COM-TB, 2003.

[BADARD, BRAUN 03] T. Badard and A. Braun : *OXYGENE : An interoperable platform enabling the deployment of geographic Web services,* in Actes de la Conférence GISRUK'03, pp. 194-196, City University, London (UK), April 9-11, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-016-S-COM-TB, 2003.

[BALLEY 03] S. Balley : *Assisting users in selecting and restructuring data sets,* in Actes de la Conférence GeoPro'03 : Semantic processing of Spatial data, 5-7 novembre 2003, Mexico, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-017-S-COM-SB, 2003.

[BALLEY 03] S. Balley : *Automated interpretation of user needs for geographical information,* International Conference on Geoinformatics and Modeling Geographical Systems, 5-8 août 2003, Pékin (Chine), papier accepté mais conférence annulée, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-018-S-COM-SB, 2003.

[BARD 03] S. Bard : *Knowledge Imprecision for cartographic Generalisation Assessment,* in Actes de la Conférence the 2nd International Symposium on Spatial Data Quality, pp. 391-401, W. Shi, M.F. Goodchild and P.F. Fisher (Eds), Hong-Kong (Chine), laboratoire COGIT, IGN-SR-03-019-S-COM-SB, 2003.

[BARD 03] S. Bard, B. Bouchon-Meunier, A. Ruas & M. Detyniecki *: Gestion des connaissances imprécises pour évaluer la généralisation cartographique,* in Actes de la Conférence LFA'03, Tours (France), laboratoire COGIT, IGN-SR-03-020-S-COM-SB, 2003.

[BARD 03] S. Bard : *Evaluation of generalisation quality,* 5ème réunion de la Commission de l'ACI en généralisation, Progress in automated Map Generalisation, Paris (France), avril 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-033-S-COM-SB, 2003.

[BENTRAH et al 03] O. Bentrah, N. Paparoditis and M. Pierrot Deseilligny : *International advanced Workshop on virtual geographic Environments and Geo-collaboration,* Conference "Modeling Urban 3D Environments : The Stereopolis System", Hong Kong (Chine), 15-16 décembre 2003, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-034-C-COM-OB, 2003.

[BRETAR et al 03] D.J. Weydahl, F. Bretar and P. Bjerke : *Comparing RADARSAT-1 and IKONOS satellite images for urban features detection*, 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas, Berlin, Germany, février 2003, in Proceedings pp. 305-308, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-006-C-COM-FB, 2003.

[BRETAR et al 03] F. Bretar, M. Pierrot Deseilligny and M. Roux : *Estimating Intrinsic Accuracy of Airborne Laser Data with local 3D-offsets, International* Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS, Dresden (Germany), octobre 2003, in Actes, pp. 20-26, volume XXXIV, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-036-C-COM-FB, 2003.

[BOCK et al 03] O. Bock, J. Tarniewicz, Y. Morille, J. Pelon & Ch. Thom : *Mesure de profils verticaux de vapeur d'eau dans la troposphère par lidar Raman,* in Actes des Ateliers d'Expérimentation et d'Instrumentation, Brest (France), 28-29 janvier 2003, laboratoire OEMI, IGN-SR-03-003-O-COM-OB, 2003.

[BOCK et al 03] O. Bock, M.-N. Bouin, Y. Morille and T. Lommatzsch : *Study of the sensitivity of ZTD estimates to GPS data analysis procedure,* EGS XXVIII General Assembly, Nice (France), April 2003, laboratoire OEMI, IGN-SR-03-004-O-COM-OB, 2003.

[BOCK et al 03] O. Bock, J. Tarniewicz, J. Pelon, Ch. Thom and A. Dabas : *Night-time water vapor profiles retrieved with a mobile Raman lidar and radiosondes during the AIRS calibration field campaign,* 6th International Symposium on Tropospheric Profiling (ISTP'03), Leipzig (D), September 14th-20th, laboratoire OEMI, IGN-SR-03-005-O-COM-OB, 2003.

[BOCK et al 03] O. Bock, C. Flamant, E. Richard, C. Keil and M.-N. Bouin : *Validation of precipitable water from operational analyses and re-analyses with GPS during MAP IOP 2A and IOP 8,* in Actes de l'EGS'03, Nice (France), laboratoire LAREG, IGN-SR-03-011-O-COM-OB, 2003.

[BOCK et al 03] O. Bock, C. Flamant, E. Richard, C. Keil and M.-N. Bouin : *Time series of satellite laser ranging station positions*, in Actes de SF2A'03, Bordeaux (France), juin 2003, IGN, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-015-G-COM-DC, 2003.

[BONIN 03] O. Bonin : *Large deviation theorems for weighted comound Poisson sums. Probability and mathematical Statistics*, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-002-S-ART-OB, 2003.

[BONIN, ROUSSEAUX 04] O. Bonin and F. Rousseaux : *Digital terrain model quality assesment : insights on how to minimize and handle commons artefacts*, Vienna, in Actes de ISSDQ'04, laboratoire COGIT, IGN-SR-04-014-S-COM-OB, 2004.

[BOUIN et al 03] J. Noir, A. Walpersdorf, M.-N. Bouin, J. Van Baelen and J.-P. Lafore : *GPS tropospheric water vapour observations for west african monsoon : a preliminary study*, in Actes de l'EGS'03, Nice (France), laboratoire LAREG, IGN-SR-03-011-G-COM-MNB, 2003.

[BOUIN et al 03] F. Masson, C. Champollion, M.-N. Bouin, A. Walpersdorf, J. Van Baelen, E. Doerflinger and O. Bock : *GPS water vapor tomography : first results from the ESCOMPTE field experiment,* in Actes de l'EGS'03, Nice (France), laboratoire LAREG, IGN-SR-03-012-G-COM-MNB, 2003.

[BOUIN et al 03] M.-N. Bouin, C. Flamant, E. Richard, C. Keil and O. Bock : *Validation of precipitable water from operational analyses and re-analyses with GPS during MAP IOP 2A and IOP 8,* in Actes de l'EGS'03, Nice (France), laboratoire LAREG, IGN-SR-03-014-G-COM-MNB, 2003.

[BOUIN et al 03] G. Wöppelmann, M.-N. Bouin and Z. Altamimi : *Global GPS Analysis for geodetic Tide Gauge Monitoring,* 91èmes Journées Luxembourgeoises de Géodynamique, Münsbach (Luxembourg), 6-8 octobre 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-031-G-COM-GW, 2003.

[BOUIN et al 03] G. Wöppelmann, M.-N. Bouin and Z. Altamimi : *A French Contribution to TIGA-PP*, Statuts report presented at the IGS Workshop held in Nice (France), April 5, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-034-G-COM-MNB, 2003.

[BRETAR et al 03] F. Bretar, M. Pierrot Deseilligny and M. Roux : *Estimating intrinsic Accuracy of AirborneLaser Data with local 3D-Offsets,* Workshop on 3D Reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data, Dresden (D), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-016-C-COM-FB, octobre 2003.

[BUCHER 03] B. Bucher : *Translating user needs for geographic information into meta-data querie*, in Actes de la 6ème Conférence AGILE, pp. 567-576, Lyon (France), avril 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-021-S-COM-BB, 2003.

[BUCHER 03] B. Bucher, D. Richard and G. Flament : *Automated map generalisation using communicating agents,* in Actes de la 21ème Conférence internationale de cartographie (ACI/ICA), pp. 160-169, Durban (Afrique du Sud), 10-16 août 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-022-S-COM-BB, 2003.

[CHEHATA et al 03] N. Chehata, F. Jung, M. Pierrot Deseilligny and G. Stamon : *A Region-Based Matching Approach fro 3D-Roof Reconstruction from HR Satellite Stereo Pairs*, in Proceedings of DICTA'03, Digital Image Computing Techniques and Applications, 10-12 décembre 2003, Sydney, Australie, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-032-C-COM-NC, 2003.

[COULOT et al 03] D. Coulot, P. Bério, P. Exertier and O. Laurain : *Validation of precipitable water from operational analyses and re-analyses with GPS during MAP IOP 2A and IOP 8*, in Actes de l'EGS'03, Nice (France), IGN, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-014-G-COM-OB, 2003.

[COULOT et al 03] D. Coulot, P. Bério, P. Exertier and O. Laurain : *Time series of satellite laser ranging station positions Time,* in Actes de SF2A'03, Bordeaux (France), juin, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-015-G-COM-DC 2003.

[DE JOINVILLE 03] O. de Joinville : *DSM derived from laser scanner data,* PRIP'03, Minsk, Biélorussie, 20-23 août 2003, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-001-C-COM-ODJ, 2003.

[DEHANT et al 03] V. Dehant, M. Feissel-Vernier, O. de Viron, C. Ma, M. Yseboodt and C. Bizouard : *Remaining error sources in the nutation at the sub-milliarcsecond level*, JGRB'03, 108, 2275, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-040-G-COM-MFV, 2003.

[DUCHÊNE 03] C. Duchêne : *Cartographic Generalisation using Cooperative Agents,* in Actes de la 2ème Conférence sur Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, AAMAS'03, 3 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-023-S-COM-CD, 2003.

[DUCHÊNE 03] C. Duchêne : *Coordinative agents for automated generalisation of rural areas,* 5ème Conférence de la Commission de l'ACI en généralisation, Progress in automated map generalisation, Paris (France), avril 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-034-S-COM-CD, 2003.

[DUCHÊNE et al 03] C. Duchêne, S. Bard, X. Barillot, A. Ruas, J. Trévisan and F. Holzappfel : *Quantitative and qualitative description of building orientation,* 5ème Conférence de la Commission de l'ACI en généralisation, Progress in automated map generalisation, Paris (France), avril 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-031-S-COM-CD, 2003.

[DUCHÊNE et al 03] C. Duchêne, S. Bard, X. Barillot, A. Ruas, J. Trévisan and F. Holzappfel : *An Interface to specify,* January, disponible sur le site : http://www.laser-scan.com/eurosdr/hubert_bucher_balley_ruas.htm, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-035-S-COM-CD, 2003.

[DUCHÊNE, CAMBIER 03] C. Duchêne & C. Cambier : *Généralisation cartographique avec des agents qui voient et communiquent,* in Actes des 9èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, JFSMA'03, Hammamet, (Tunisie), laboratoire COGIT, IGN-SR-03-024-S-COM-CD, 2003.

[DUCHÊNE, CAMBIER 03] C. Duchêne & C. Cambier : *Fonctionnalité et vulnérabilité des réseaux de transport - Le cas du métro parisien,* in Actes des 6èmes Rencontres Théo-Quant-Géographie théorique et quantitative, Besançon (F), 14 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-025-S-COM-CD, 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *VLBI astrogéodésique et Sciences de la Terre,* École d'été du GdR Géodésie-Géophysique, août 2003, Forcalquier (France), http://lareg.ensg.ign.fr/AGRET/Forcalquier03.html, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-001-G-COM-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER et al 03] V. Dehant, O. de Viron, M. Feissel-Vernier, C. Ma, A. Rivoldini and F. Renaud : *Informations on the Earth system from nutations,* UGGI Symposium G6, Sapporo (Japon) (communication non publiée), laboratoire LAREG, IGN-SR-03-013-G-COM-MFV, juillet 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *Reference systems and frames : definition, maintenance, connections and influence,* in Actes de SF2A'03, Bordeaux, (France), IGN, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-017-G-COM-MFV, juin 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *La décomposition de séries chronologiques par Crono_Vue,* Colloque d'ouverture du GdR Géodésie-Géophysique, Paris (France), novembre 2003 (communication non publiée), laboratoire LAREG, IGN-SR-03-023-G-COM-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER et al 03] X. Chavet, J.-J. Valette and M. Feissel-Vernier : *Analysis of Geocenter Time Series derived from SLR,* GPS and DORIS. AGU Fall Meeting, poster, San Francisco (USA), 8-12 décembre 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-025-G-COM-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER et al 03] G. Tavernier, M. Feissel-Vernier, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin and P. Willis : *The future international Doris service*, Symposium G14 (communication non publiée), EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice (France), avril 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-027-G-COM-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *DORIS contributions to IERS,* IERS Retreat (communication non publiée), Paris (France), 31 mars-1er avril 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-028-G-COM-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *Outline of the future IDS products* (communication non publiée), DORIS Analysis Workshop, Marne-la-Vallée (France), 20-21 février 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-029-G-COM-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *La contribution du système DORIS à la surveillance des déformations de la Terre* (communication non publiée), Journées Recherche de l'IGN, Saint-Mandé (France), 4-5 février 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-030-G-COM-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER et al 03] V. Dehant, O. de Viron, M. Feissel-Vernier, C. Ma, A. Rivoldini and F. Renaud : *Free and forced nutation analysis* (communication non publiée), Symposium G9, EGS, Nice (France), 7-11 avril 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-037-G-COM-MFV, juillet 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *Measuring the Earth's precession-nutation beyond the milliarcesecond level : some perturbing effects* (communication non publiée), Potsdam (D), juillet 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-038-G-COM-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *Stable radio sources selection for the maintenance of the ICRF axes,* laboratoire LAREG, IGN-SR-03-039-G-COM-MFVNP, laboratoire LAREG, 2003.

[FLAMANC et al 03] D. Flamanc, G. Maillet and H. Jibrini : *3-D City models : an operational approach using aerial images and cadastral maps,* PIA'03, (Photogrammetric Image Analysis), Münich (D), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-014-C-COM-DF, 2003.

[GLEYZE, ROUSSEAUX 03] J.-F. Gleyze : *Impact of relief accuracy on flood simulations and road network vulnerability analysis,* in Actes de la 13ème édition de la Conférence Européenne de Géographie Théorique et Quantitative- (CQTG'03), Lucca, Italy, 14 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-026-S-COM-JFG, 2003.

[GLEYZE, ROUSSEAUX 03] J.-F. Gleyze and F. Rousseaux : A *formal model for the specifications of geographic data-bases,* in Actes de la Conférence GeoPro'03 : semantic Processing of Spatial data, 5-7 novembre 2003, Mexico, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-027-S-COM-JFG, 2003.

[GUIGUES et al. 03b] L. Guigues, H. Le Men & J.-P. Cocquerez : *Analyse ensembles-échelle d'une image*, in Actes du Colloque sur le Traitement du Signal et des Images (GRETSI'03), Paris, France, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-031-C-COM-LG, septembre 2003.

[GUIGUES et al 03a] L. Guigues, H. Le Men and J.-P. Cocquerez : *Scale-Sets Image Analysis* ICIP'03, in Actes de la Conférence, pp. 299-306, Barcelone (E), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-038-C-COM-LG, septembre 2003.

[HUBERT et al 03] F. Hubert, B. Bucher, S. Balley and A. Ruas : *A method based on samples to capture user needs for generalisation,* 5ème Conférence de la Commission de l'ACI en généralisation, Progress in automated map generalisation, Paris (France), avril 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-036-S-COM-FH, 2003.

[HUBERT, RUAS 03] A. Ruas & F. Hubert : *Amélioration d'un MNT avec les couches vecteurs de la BD TOPO,* Colloque Système d'Information Géographique & Risques (co-organisé par le laboratoire COGIT & le CEREVE), École Nationale des Ponts & Chaussées, Marne-la-Vallée (France), laboratoire COGIT, IGN-SR-03-037-S-COM-AR, 2003.

[JAMET, DIAMENT 03] O. Jamet and M. Diament : *A minimum energy condition for the inverse gravimetric problem,* in Proceedings IUGG/IAG General Assembly, Sapporo (Japon), 2-11 juillet 2003, Springer (rang B), article soumis à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-003-G-COM-OJ, 2003.

[JAMET, AZZOUT 03] O. Jamet and Y. Azzout : *A versatile gravimetry/gradiometry simulation software,* poster présenté à l'IUGG/IAG General Assembly, Sapporo (Japon), 2-11 juillet 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-004-G-COM-OJ, 2003.

[JUNG 03] F. Jung : *Corase-to-fine object recognition,* IJCV'03, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-023-C-COM-FJ, 2003.

[JUNG, PAPARODITIS 03] F. Jung and N. Paparoditis : *Extracting 3D free-form surface boundaries of man-made objects from multiple calibrated images,* in Proceedings of the ISPRS Conference Photogrammetric Image Analysis, IAPRS, Münich, Vol. F2, Part 3/W0, pp. 39-44, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-004-C-COM-FJ, septembre 2003.

[LE BAIL 03] K. Le Bail *: Les outils MATLAB pour traiter les séries temporelles - Exemples sur une série du PSMSL : hauteurs d'eau de la station BREST*, G2-Colloque, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-033-G-COM-KLB, 2003.

[LE BAIL 03] K. Le Bail : *Investigation of the stability of DORIS and GPS stations,* poster présenté au DORIS Analysis Workshop, Marne-la-Vallée (France), 20-21 février 2003, poster, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-043-G-COM-KLB, 2003.

[LE BAIL, FEISSEL-VERNIER 03] K. Le Bail and M. Feissel-Vernier : *Time series statistics of the DORIS and GPS colocated observations*, poster, Symposium G14, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice (France), avril 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-026-G-COM-KLB, 2003.

[LOMÉNIE et al 03] N. Loménie, J. Barbeau and R. Trias-Sanz : *Integrating Textural and Geometric Information for an Automatic Bridge Detection System,* in Actes of the 2003 International Geosciences and Remote Sensing Symposium IGARSS'03, Toulouse (France), juillet 2003, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-020-C-COM-NL, 2003.

[MARTINOTY 03] G. Martinoty *: Materials' BRDF retrieval from multiview digital aerial images,* in Proceedings of the 2003 International Geosciences and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03, Toulouse (France), juillet 2003, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-033-C-COM-GM, 2003.

[MUSTIÈRE et al 03] S. Mustière, N. Gesbert and D. Sheeren : *Toward a coherent integration of 2-D linear data into a DTM,* in Actes de la 21ème Conférence internationale de cartographie (ACI/ICA), pp. 1936-1942, Durban, Afrique du Sud, 10-16 août 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-IGN-SR-03-028-S-COM-SM, 2003.

[MUSTIÈRE et al 03] S. Mustière, D. Sheeren and N. Gesbert : *A Formal Model for the Specifications of Geographical Databases,* in Semantic Processing of Spatial Data, in Proceedings of Workshop GeoPro'03, Levachkine, Serra and Egenhofer (Eds), laboratoire COGIT, IGN-SR 03-044-COM-SM, 2003.

[PAPARODITIS et al 03] *N. Paparoditis, M. Deveau and J-P. Rivière : Integrating technologies and techniques to automate surveys,* in CDRom Proceedings of 3rd Dimension Conference, Eds. MENSI, laboratoire MATIS, IGN-SR-IGN-SR-03-042-C-NP, octobre 2003.

[PIERROT DESEILLIGNY, VIGLINO 03] A vector *Approach for automatic Interprétation of the french cadastral Map*, in Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR'03, pp. 1235-1239, Edinburgh-Scotland (UK), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-005-C-COM-MPD, 3-6 août 2003.

[ROUSSEAUX 03] F. Rousseaux : *Automatic characterisation of building alignments by means of expert knowledge,* in Actes de la 21ème Conférence internationale de cartographie (ACI/ICA), pp.1604-1615, Durban (Afrique du Sud), 10-16 août 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-030-S-COM-FR, 2003.

[ROUSSEAUX, BONIN 03] F. Rousseaux and O. Bonin : *Enrichment of a TIN with 3D vectors data,* in Actes de la Conférence GISRUK'03, Londres (UK), avril 2003, in Actes, pp. 82-85, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-029-S-COM-FR, 2003.

[RUAS, HOLZAPFEL 03] A. Ruas and F. Holzapfel : *Spatial databases integration : interpretation of multiple representations by using machine learning techniques*, in Actes de la 21ème Conférence internationale de cartographie (ACI/ICA), pp. 235-245, Durban, Afrique du Sud, 10-16 août 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-031-S-COM-AR, 2003.

[SHEEREN 03] D. Sheeren : *Spatial databases integration : interpretation of multiple representations by using machine learning techniques,* in Proceedings of the 21st International Cartographic Conference, ICC'03, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-020-S-COM-DS, 2003.

[TAILLANDIER et al 03] F. Taillandier, L. Guigues and R. Deriche : *A framework for constrained multi-scale range image segmentation*, in Proceedings of International Conference on Image Processing, ICIP'03, Barcelone (E), laboratoire MATIS, IGN-SR-03-011-C-COM-LG, septembre 2003.

[TARNIEWICZ et al 03] J. Tarniewicz, O. Bock, Y. Morille, J. Pelon and Ch. Thom : *A mobile Raman Lidar for Water Vapor profiling in the Troposhere during Nightime,* EGS XXVIII General Assembly, Nice (France), April 2003, laboratoire OEMI, IGN-SR-03-006-O-COM-JT, 2003.

[TARNIEWICZ 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 (France), 28-29 janvier 2003, laboratoire OEMI, IGN-SR-03-001-O-COM, AD, 2003.

[TRIAS-SANZ 03b] R. Trias-Sanz : *An Edge-based Method for Registering a Graph onto an Image with Application to Cadastre Registration*, in Proceedings of the 2004 International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04), Cambridge, UK, August 2004, soumis à Comité de lecture, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-042-C-COM-RTS, 2003.

[TRIAS-SANZ, LOMÉNIE 03] R. Trias-Sanz and N. Loménie : *Automatic Bridge Detection in High-Resolution Satellite Images,* in J.-L. Crowley et al, Editors, in Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'03), volume 2626 of Lecture Notes in Computer Science, pages 172-181, Graz (Austria), April 2003, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-013-C-COM-RTS, 2003.

[TRIAS-SANZ, PIERROT DESEILLIGNY 04] R. Trias-Sanz and M. Pierrot Deseilligny : *A region-based method for graph to image registration with application to cadastre data*, in Proceedings of the 2004 International Conference on Image Processing (ICIP'04), Singapore, octobre 2004, soumis à Comité de lecture, laboratoire MATIS, IGN-SR-04-015-C-COM-RTS, 2004.

[WILLIS et al 03] P. Willis, Y Bar-Sever and G. Tavernier : *DORIS as a potential part of a Global Geodetic Observing System,* UGGI General Assembly 2003, Sapporo (Japon), juillet 2003, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-047-G-COM-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] P. Willis, G. Tavernier, M. Feissel-Vernier, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries and L. Soudarin : *The proposed International DORIS Service*, UGGI General Assembly 2003, Sapporo (Japon), juillet 2003, in IAG Proceedings G02,_Springer-Verlag, communication soumise à comité de lecture, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-069-G-COM-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] B. Haines, S. Desai, P. Willis, W. Bertiger and T. Munson : *Precise Orbit Determination for JASON-1 : GPS and the 1-cm Challenge,* EGS/AGU Meeting, Nice (France), avril 2003, EAE03-A-12378, in Geophysical Research Abstracts, Volume 5, (poster), disponible sur le site : http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/02771/EAE03-A-12378.pdf, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-070-G-COM-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] B.J. Haines, S. Desai, P. Willis, W. Bertiger and T. Munson : *Precise Orbit Determination for JASON-1, GPS and the 1-cm solution,* JASON SWT, Arles (France), 18-21 novembre 2003, présentation orale, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-071-G-COM-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] G. Tavernier, M. Feissel-Vernier, J.-M. Lemoine, C. Noll, J. Ries and P. Willis : *The Future International DORIS Service*, EGS/AGU Meeting, Nice (France), avril 2003, EAE03-A-10949, in Geophysical Research Abstracts, volume 5, (présentation orale), disponible sur le site : http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/02771/EAE03-A-10949.pdf, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-072-G-COM-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] P. Willis, B. Haines, Y. Bar-Sever and L. Young : *DORIS/JASON data, what is happening in the South Atlantic Anomaly region ?* IDS Analysis Workshop, Marne-la-Vallée, France, 20-21 février 2003, disponible à : http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/2003_files/PWjason_Feb03.pdf, http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/abstr_2003.html, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-074-G-COM-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] T. Yunck, M. Heflin, F. Webb, D. Dong, S. Kedar and P. Willis : *Recovering geodetic scale with GPS*, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), décembre 2003, abstract #1696, EOS Trans, AGU, 84, 46, G41C-08 (présentation orale avec résumé), laboratoire LAREG, IGN-SR-03-076-G-COM-PW, 2003.

[WILLIS, BAR-SEVER 03] P. Willis and Y. Bar-Sever : *DORIS time series elaboration with the GOA software : Summary of station related problems (1993-2002),* IDS Analysis Workshop, Marne-la-Vallée (F), 20-21 février 2003, voir sur le site : http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/2003_files/PWseries_Feb03.pdf, http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/abstr_2003.html, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-073-G-COM-PW, 2003.

[WILLIS, BAR-SEVER 03] P. Willis and Y. Bar-Sever : *Estimating tropospheric delays from DORIS data in a multi-satellite mode,* EGS/AGU Meeting, Nice (France), avril 2003, EAE03-A-02771, in Geophysical Research Abstracts, volume 5, (poster), disponible sur le site : http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/02771/EAE03-A-02771.pdf, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-075-G-COM-PW, 2003.

Rapports de stage

[AZZOUT 03] Y. Azzout *Représentation tridimentionnelle du sous-sol appliquée à la simulation de la gravité,* rapport de stage d'ingénieur de École Supérieure Léonard de Vinci, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-009-G-STA-YA, 2003.

[BALLEY 03] S. Balley : *Intégration cohérente de données 2D et 2,5D dans une modèle numérique de terrain,* mémoire de DEA SIG, Université de Marne-la-Vallée, 32 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-043-S-STA-SB, 2003.

[CHAIRA 03] H. Chaira : *Comparaison de deux stratégies de calcul du géoïde,* rapport de fin d'étude du mastère spécialisé en géomatique, École Nationale de Tunis, Université Tunis El Manar, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-008-G-STA-HC, 2003.

[CLEAC'H, FORT 03] Aspirants Cleac'h & Fort : *Intégration de bases de données spatiales. Constitution d'une BD multi-représentation hydrographique,* chef de projet : S. Mustière, pilote de projet : T. Devogele, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-050-S-STA-CF, 21 mai 2003.

[CLEAC'H, FORT 03] Aspirants Cleac'h & Fort : *Représentation comparée de schémas et spécification de contenu,* stage de DESS de Cartographie et SIG, option : Numérique, responsables de stage : B. Bucher & S. Mustière, laboratoire COGIT, mars 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-054-S-STA-CF, 2003.

[CLEAC'H, FORT 03] Aspirants Cleac'h & Fort : *Développement d'une interface graphique pour la définition et la gestion de contraintes géographiques de mise à jour,* mémoire de fin d'études, DUT informatique, Institut Universitaire Technologique de Villetaneuse (France), 30 juin 2003, 63 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-056-S-STA-AC,2003.

[CHESNIER 03] M. Chesnier : Classification de données laser, DESS d'Intelligence artificielle, stage effectué d'avril à septembre 2003, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-043-C-STA-MC,2003.

[DUSSARD 03] Y. Dussart *: Développement d'une interface graphique pour la définition et la gestion de contraintes géographiques de mise à jour,* mémoire de fin d'études, DUT informatique, Institut Universitaire Technologique de Villetaneuse, France, 30 juin 2003, 63 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-049-S-STA-YD, 2003.

[FERNIQUE 03] T. Fernique : *Évaluer et aménager les réseaux de transport*, rapport de stage de MIM2, École Normale Supérieure de Lyon, 30 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-005-S-STA-TF, 2003.

[GODER 03] G. Goder : *Représentation comparée de schémas et spécifications de contenu,* rapport de stage du DESS Cartographie et Système d'Information Géographique, ENSG & Université Paris-1, 21 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-007-S-STA-GG, 2003.

[GASS 03] Gass : *Classification automatique de zones de végétation et de routes dans les images aériennes quatre canaux (IR, R,V,B),* laboratoire MATIS, IGN-SR-03-028-C-STA-G, 2003.

[GYÖRGYI 03] G. Györgyi : *Représentation comparée de schémas et spécification de contenu,* rapport de stage de DESS de Cartographie et Système d'Information Géographique, option : Numérique, responsables de stage : B. Bucher & S. Mustière, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-048-S-STA-GG, mars 2003.

[GYÖRGYI 03] G. Györgyi : *Intégration de bases de données spatiales. Constitution d'une BD multi-représentation hydrographique,* projet de fin d'étude de l'École Navale, 50 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-055-S-STA-GG, 2003.

[LAFRAGUETA 03] A. Lafragueta : *Réalisation d'une interface de consultation pour les traitements de généralisation,* rapport de stage de DESS Imagerie Électronique, Université Paris-6, 30 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-044-S-STA-AL, septembre 2003.

[MABANZA 03] K. Mabanza : *Méthodes de compensation appliquées à l'aéro-triangulation,* rapport de stage du DEA-MVA de l'ENS Cachan, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-007-C-STA-KM, 2003.

[MICHAUX 03] P. Michaux : *Développement d'une bibliothèque de géométrie algorithmique pour la plate-forme OXYGENE*, mémoire de DEA en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, France, 37 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-053-S-STA-PM, 1er juillet 2003.

[NEMPONT 03] Nempont : *Extraction de facettes par fusion de données radiométriques et de points 3-D,* rapport de stage de 2ème année d'école d'ingénieurs, ENST Paris, laboratoire MATIS, IGN-SR-030-C-STA-N, 2003.

[PÉCHEUR 03] G. Pécheur : *GUMP, un outil de vectorisation de la couche végétation de la BD Topo Pays (Manuel opérateur et programmeur),* rapport de stage EVAFI programmeur, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-003-C-STA-GP, 2 septembre 2003.

[PELÉ 03] C. Pelé : *Développement d'une bibliothèque de géométrie algorithmique pour la plate-forme OXYGENE,* mémoire de DEA en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, 37 pages, IGN, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-051-S-STA-CP, 1er juillet 2003.

[RAMONAT 03] O. Ramonat : *Détection de façades du Modèles Numériques d'Elévation*, ENST Bretagne, stage effectué d'avril à septembre, 2003, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-044-C-STA-MC,2003.

[ROUSSEAUX 03] F. Rousseaux : *Étude des incertitudes lors de calculs de risques d'inondations,* mémoire de DEA de statistique, Université Paris-6, 70 pages, laboratoire COGIT, 03-038-S-STA-FR, 2003.

[SILVERT 03] Silvert : *Étude de la cohérence altimétrique entre une base de données vecteur et des images*, rapport de stage, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-009-C-STA-S , 2003.

[THILLARD 03] G. Thillard : *Contribution à une plate-forme d'aérotriangulation et de saisie 3-D pour la photogrammétrie terrestre,* rapport de stage MATMECA, Université de Bordeaux-1, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-028-C-STA-GT, septembre 2003.

[THOMAS 03] E. Thomas : *Développement en harmoniques sphériques de la contribution au potentiel de gravité d'un volume polyhédrique représenté par sa surface externe*, rapport de stage de Maîtrise d'Ingéniérie Mathématique, UFRST, 2003.

Rapports internes et comptes rendus

[ABD-EL-KADER, BALLEY 03] Y. Abd-el-Kader & S. Balley : *Compte rendu du Congrès ISSDQ'03,* 2ndSymposium on Spatial Data Quality, laboratoire COGIT, Hong-Kong (Chine), 18-20 mars 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-040-S-CRD-YAEK, 2003.

[AH PINE 03] J. Ah Pine : *Compte rendu des Journées Francophones de la Toile*, JFT'03, 30 juin-2 juillet 2003, Tours (France), laboratoire COGIT, IGN-SR-03-039-S-CRD-JAP, 2003.

[AIRAULT 03] S. Airault : ATS2B - *Tests complémentaires avec utilisation de données exogènes,* laboratoire MATIS, IGN-SR-03-008-C-RAP-SA, 2003.

[ALTAMIMI et al 03] Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher : *The impact of a No-Net-Rotation Condition on ITRF2000,/*grl, 30 (2), 1064, doi:10.1029/2002GL016279, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-018-G-RAP-ZA 2003.

[BARD 03] S. Bard : *Compte rendu du Congrès ISSDQ'03, 2ndSymposium on Spatial Data Quality,* Université polytechnique de Hong-Kong (Chine), 18-20 mars 2003, disponible sur le site : http://www.hk-cyber/net/sdq, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-017-S-CRD-SB, 2003.

[BARD 03] S. Bard : *Compte rendu du Congrès ECQTG'03* (13thEuropean Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography), Lucca (Italy), September 5-9, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-041-S-CRD-SB, 2003.

[BOUIN, GUILLOT 03] M.-N. Bouin & A. Guillot : *Rapport de mission océanographique NIVMER403,* Institut Paul-Émile-Victor, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-010-G-RAP-MNB, 2003.

[BOURON 03] P. Bouron : *Nivellement avec assistance GPS (NIVAG) : spécifications et mise en œuvre des opérations de maintenance du réseau NGF,* mémoire d'examen professionnel pour l'accès au grade d'ITGCE, IGN-SGN, 03-001-R-RAP-PB 2003.

[BRAUN 03] A. Braun : *Conception d'outils d'aide à l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques utilisateur,* rapport de définition détaillée EVAFI, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-S-RAP-AB, 10 octobre 2003.

[BUCHER 03] B. Bucher : *Notions de bases de données. Extraits du livre « Bases de Données - objet et relationnel » de G. Gardarin,* rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-051-S-RAP-BB, 2003.

[DUCHÊNE, MUSTIÈRE 03] C. Duchêne & S. Mustière : *Compte rendu du Séminaire « Multi-échelles »,* organisé par le GdR Système d'Information Géographique, Avignon (F), laboratoire COGIT, IGN-SR-03-004-S-CRD-CD, 26 mai 2003.

[FEISSEL-VERNIER et al 3] M. Feissel-Vernier (& 26 auteurs) : *Géodésie et géodynamique,* rapport quadriennal du CNFGG pour l'Assemblée Générale de l'UGGI, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-016-G-RAP-MFV, CNFGG 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier : *Selecting stable extragalactic compact radio sources from the permanent astrogeodetic VLBI program,* A&A 403, 105, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-024-G-RAP-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier (Éd.) : *Minutes du Colloque d'ouverture du GdR Géodésie-Géophysique,* Paris (France), novembre 2003, disponible sur le site : http://lareg.ensg.ign.fr/AGRET/prog_03.html, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-040-G-RAP-MFV, 2003.

[FEISSEL-VERNIER 03] M. Feissel-Vernier (Éd.) : *Report of the 2003 IDS Analysis Workshop,* Marne-la-Vallée (France), février 2003, disponible sur le site : http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/prog_2003.html, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-042-G-RAP-MFV, 2003.

[GALILEO 03] Galileo (Collectif) : *Un enjeu stratégique, scientifique, technique,* Académie de marine, Bureau des longitudes, Académie nationale de l'air et de l'espace, ouvrage collectif, Bureau des longitudes, Paris (France), juin 2003, 206 pages, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-079-G-RAP-PW, 2003.

[GLEYZE 03] J.-F. Gleyze : *Compte rendu du Symposium EuroSDR : Visualisation and Rendering*, 22-23 janvier 2003, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-042-S-CRD-JFG, 2003.

[HOTTIER 03] Ph. Hottier : *Essais Applanix. Comparaison avec l'aérotriangulation analytique*, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-018-C-RAP-PH, 9 juillet 2003.

[IGN-SBV 03] SBV/03.0768 - *Bilan de l'opération d'intégration des données de la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB) dans la BD Topo,* rapport interne, IGN-SR-03-0XX-R-RAP-SBV, 5 août 2003.

[MUSTIÈRE, BONIN 03] S. Mustière & O. Bonin : *Intégration de bases de données spatiales. Constitution d'une BD multi-représentation hydrographique,* chef de projet : S. Mustière, pilote de projet : Thomas Devogele, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-053-S-RAP-SM, 21 mai 2003.

[PANET 03] I. Panet : *Comparaison de trois familles d'ondelettes pour la représentation du champ de pesanteur terrestre,* rapport de recherche R6, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-006-G-RAP-IP, 2003.

[TRIAS-SANZ 03a] R. Trias-Sanz : *Locating and classifying vegetation areas in high-resolution multi-spectral aerial images with very high reliability using supplementary information : A literature review*, in Technical Report 2003/1, SIP-CRIP5, Université Paris-5, laboratoire MATIS, IGN-SR-03-041-C-RAP-RTS, novembre 2003.

[WILLIS 03] P. Willis : *Report on SSG Precise Microwave System,* CSTG Bull, rapport de la Commission CSTG, distribué sur CD-ROM à l'UGGI, Sapporo (Japon), laboratoire LAREG, IGN-SR-03-065-G-RAP-PW, 2003.

[WILLIS 03] P. Willis : *Report on SSG Precise Microwave System,* CSTG Bull, re-publié dans les Travaux de l'AIG, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-066-G-RAP-PW, 2003.

[WILLIS 03] P. Willis : *International DORIS Service*, in IERS Annual Report 2002, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-081-G-RAP-PW, 2003.

[WILLIS et al 03] P. Exertier, J. Nicolas, P. Bonnefond, P. Willis, J.-P. Berthias, O. Laurain, & F. Barlier : *Vers une orbitographie centimétrique des satellites océanographiques*, *Toward a centimetrical Orbitography for oceanographical Satellites,* rapport quadriennal pour l'Union Géodésique & Géophysique Internationale, 1999-2003, rapport national français du CNFGG, pp. 71-79, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-078-G-RAP-PW, 2003.

[WILLIS, SHUM 03] C.K. Shum and P. Willis : *Report of IAG Section II, Advanced Space Technology*, travaux de l'Association Internationale de Géodésie, distribué sur CD-Rom à l'UGGI, 106 pages, Sapporo (Japon), disponible sur le site : http://www.gfy.ku.dk/~iag/Travaux_03/SECIIpresi.html, laboratoire LAREG, IGN-SR-03-080-G-RAP-PW, 2003.