La recherche à l'Institut Géographique National : Activité 2001

Serge Motet, Marc Pierrot Deseilligny, Christian Thom, Anne Ruas, Michel Kasser, Martine Feissel, Patrick Sillard, Claude Boucher, Marie-Noelle Bouin, Jean Matthieu Nocquet, et al.

▶ **To cite this version:**

Serge Motet, Marc Pierrot Deseilligny, Christian Thom, Anne Ruas, Michel Kasser, et al.. La recherche à l'Institut Géographique National : Activité 2001. Bulletin d'information de l'IGN N°73. 2002. hal-02372784

HAL Id: hal-02372784

https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372784

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 2001

La recherche en 2001

01 Classement IGN-SR : 02-001/R-LIV

02 Livre

03 Nom et adresse du directeur de la publication
Jacques Poulain
IGN, Direction Technique
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDE CEDEX

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

05 Réalisé au Service de la Recherche de l'IGN
Institut Géographique National
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDE CEDEX

06 Titre *: La recherche en 2001*

07 Date d'édition : 2002/3

13 Numéro 73

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

Résumé

Ce numéro du Bulletin d'information dresse le bilan des activités de recherche de l'Institut Géographique National en 2001. Les quatre laboratoires de l'IGN présentent leurs travaux en photogrammétrie, traitement d'image, instrumentation, système d'information géographique et géodésie. Quelques sujets sont développés : les traitements automatiques sur les images aériennes pour lever des bâtiments et détecter des changements, l'apport du GPS en aéro-triangulation, la représentation des connaissances pour faciliter l'utilisation des données, les travaux d'un projet européen sur la multi-représentation, la modélisation cartographique du réseau routier et deux études géodésiques sur la télémétrie laser et la flexion continentale sous la charge océanique.

Mot-clé principal : Information géographique.

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

Abonnement gratuit, courrier & publications, s'adresser à :
Isabelle Melot
IGN, Direction Technique,
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDE CEDEX
isabelle.melot@ign.fr

Table des matières

A. Bilan **1**

A.1 La recherche à l'IGN (*S. Motet)* **1**

A.2 Les travaux du laboratoire MATIS (*M. Pierrot Deseilligny)* **5**

A.3 Les travaux du laboratoire OEMI *(Ch. Thom)* **7**

A.4 Les travaux du laboratoire COGIT *(A. Ruas)* **9**

A.5 Les travaux du laboratoire LAREG *(M. Kasser)* **11**

B. Quelques actions marquantes **17**

B.1 Trois approches pour la construction automatique de modèles 3-D de bâtiments en imagerie aérienne haute résolution (*F. Fuchs, H. Jibrini, G. Maillet, N. Paparoditis, M. Pierrot Deseilligny & F. Taillandier)* **17**

B.2 Détection de changements par comparaison de couples stéréoscopiques *(F. Jung)* **27**

B.3 Aérotriangulation analytique, GPS absolu et autres problèmes *(Ph. Hottier)* **35**

B.4 Un environnement de conception coopérative d'utilisations de données géographiques *(B. Bucher)* **49**

B.5 Vers la multi-représentation : le projet MurMur *(S. Balley)* **61**

B.6 Exagération des formes basée sur une nouvelle modélisation du linéaire routier *(J.-G. Affholder)* **75**

B.7 Étude de la flexion continentale sous la charge océanique à partir des données RGP *(M.-N. Bouin)* **81**

B.8 Contribution de la télémétrie laser à la nouvelle représentation du système de référence terrestre et à la géodynamique *(D. Coulot, J. Nicolas & P. Exertier)* **89**

B.9 ITRF2000 *(Zuheir Altamimi, Patrick Sillard & Claude Boucher)* **99**

B.10 Géodésie physique : champ de pesanteur et nivellement, bilan d'activité 2001 *(Olivier Jamet & Patrick Sillard)* **107**

C. Publications **111**

Thèses de doctorat **111**

Articles (journaux scientifiques) **112**

Autres articles **113**

Communications à congrès **113**

Autres communications **115**

Livres **116**

Rapports de stage **116**

Rapports internes et comptes rendus **117**

A.1 La recherche à l'IGN

Serge Motet

Ce bulletin n° 73 présente l'activité de recherche de l'Institut Géographique National pour l'année 2001.

L'activité de recherche de l'IGN est, sous de nombreux aspects, comparable à celle d'autres centres de recherche. Elle fait l'objet d'un suivi scientifique externe et ses laboratoires ont pour objectif de contribuer à l'accroissement des connaissances par leurs publications.

Sa particularité est la synergie avec les missions principales de production géodésique, photographique et cartographique de l'IGN. Son originalité est donc la finalité des recherches. La recherche est menée dans la perspective de créer, à moyen ou long terme, un procédé, un produit ou un service dans l'un des domaines de compétence de l'IGN.

Organisation de la recherche

L'IGN est un établissement public à caractère administratif. La recherche est une de ses missions. L'orientation et l'évaluation de la recherche sont soumises à un Comité scientifique et technique, placé auprès du Directeur général.

La recherche est mise en œuvre au sein de quatre laboratoires :

- le MATIS, pour la photogrammétrie et l'analyse d'image ;
- le LOEMI, pour l'instrumentation et les capteurs ;
- le COGIT, pour les systèmes d'information géographique et la cartographie ;
- le LAREG, pour la géodésie.

Les trois premiers laboratoires font partie du Service de la recherche et se trouvent à Saint-Mandé (94). Le laboratoire LAREG est une unité de l'École nationale des sciences géographiques (ENSG), à Marne-la-Vallée (77).

Quelques points marquants

L'année 2001 est une année de consolidation du programme de recherche de l'IGN, prévu au Schéma directeur de la recherche et qui couvre la période allant de 2000 à 2005. On peut retenir les points suivants.

Photogrammétrie et traitement d'image

Les travaux de recherche, pour intégrer les planches cadastrales dans une référence géographique, se sont concrétisés dans un processus complet.

Les études sur la fabrication de modèles numériques d'élévation par un processus de corrélation faisant appel à plus de deux vues se sont poursuivies. Nous avons obtenu des premiers résultats.

Franck Jung a soutenu sa thèse de doctorat sur la détection de changements à partir d'images prises à des dates différentes. Les résultats sont encourageants sur les bâtiments.

Instrumentation

La mise en production des caméras numériques développées à l'IGN s'est poursuivie.

Une action de recherche sur la détermination du délai troposphérique a été lancée. Pour cette action, un laser LIDAR a été assemblé et testé lors de la campagne Escompte.

Information géographique

Une étude préalable sur la carte à l'échelle 1 : 25 000, produite à partir de la BD Pays, a débuté. Les activités sur les évolutions géographiques, en particulier les implications thématiques en urbain, ont été poursuivies. Les recherches sur la répercussion de la qualité des données pour les applications aux risques se sont amplifiées.

Géodésie

Concernant la géodésie physique, un effort particulier a été fait sur les méthodes statistiques d'inversion du champ de pesanteur.

Effectifs

Les effectifs de recherche sont sensiblement constants. Leur répartition pour l'année 2001 dans les différents laboratoires et les différentes catégories est résumée par le tableau A.1.

tableau A.1 *: effectifs 2001*

		chercheurs	*dont thésards*	*dont CdR*	*support*	*TOTAL*
MATIS	1 janvier	**15**	9	2	2	**17**
	31 déc.	**17**	7	1	1	**18**
LOEMI	1 janvier	**4**	1	1	2	**6**
	31-déc.	**4**	1	1	2	**6**
COGIT	1 janvier	**17**	10	5	1	**18**
	31 déc.	**17**	9	4	1	**18**
LAREG	1 janvier	**8**	3	2	4	**12**
	31 déc.	**10**	5	3	3	**13**

Dans les colonnes 4 et 5 du tableau A.1, se trouvent les étudiants inscrits en doctorat, qui travaillent à l'IGN. Ces étudiants sont : soit, des ingénieurs fonctionnaires, soit sous contrat de recherche (CdR). La vingtaine d'étudiants de troisième cycle qui ont fait un stage dans les laboratoires n'apparaissent pas dans le tableau. Il faut noter aussi que, avec le soutien de la DRAST du Ministère de l'équipement, l'IGN a accueilli le docteur Nicolas Regnault de l'Université d'Edimbourg.

Résultats

Publications

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

Doctorats

Sept thèses ont été soutenues en 2001.

tableau A.2 *: doctorats soutenus en 2001*

	Date de soutenance	**Titre de la thèse**
Olivier de Joinville	26 mars	Évaluation de la qualité d'une cartographie urbaine à l'aide d'images aériennes à haute résolution.
Frank Fuchs	27 avril	Contribution à la reconstruction du bâti en milieu urbain, à l'aide d'images aériennes stéréoscopiques à grande échelle. Étude d'une approche structurelle.
Sébastien Mustière	8 juin	Apprentissage supervisé pour la généralisation cartographique.
Laurent Morel	3 octobre	Références géodésiques pour les futures missions altimétriques : application à la mission JASON.
Atef Bel Hadj Ali	22 octobre	Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques : application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques.
Franck Jung	2 novembre	Reconnaissance d'objets par focalisation et détection de changements.
Annabelle Boffet	13 décembre	Stratégies distribuées de généralisation à base de contraintes métriques et sémantiques.

Contrats de recherche

L'IGN participe à deux projets de recherche soutenus par la Commission européenne :

- le projet MurMur (IST-1999-10723) étudie la représentation multiple. Des données des bases BD Carto et BD Topo de l'IGN ont été unifiées dans une maquette. Cette maquette s'appuie sur le langage de conception MADS et sur l'éditeur graphique développé par le projet ;
- le projet V-planet (IST-2000-28095) développe un logiciel pour visualiser des données géographiques 3-D. L'IGN a contribué aux études sur le marché potentiel et sur l'utilisation des données.

Au niveau national, les principales activités de valorisation concernent :

- diverses expertises en photogrammétrie et traitement d'images au profit du CNES et de la Défense. Ces études portent notamment sur les modèles numériques d'élévation ;
- la réalisation de caméras numériques pour le CNES et l'ONERA.

Projets internes

Trois projets visant à transférer des résultats de recherche vers la production sont en cours.

Le projet interne de « Diffusion des données » a été lancé en juin 2001, pour trois ans. Il développe des processus automatiques de documentation, d'archivage et de diffusion des données. Ces développements visent, à la fois, une meilleure circulation de l'information à l'intérieur de l'IGN et une augmentation de la diffusion sur l'Internet.

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

Enfin, des résultats significatifs ont été obtenus par le projet « Carto 2001 ». Ce projet a pour objectif d'automatiser le processus de rédaction des cartes au 1 : 100 000, en s'appuyant sur les résultats de recherche du laboratoire COGIT concernant la généralisation, les mises à jour et le placement automatique des écritures.

A.2 Les travaux du laboratoire MATIS

Marc Pierrot Deseilligny (responsable du thème Image & photogrammétrie)

Actions de recherche du laboratoire MATIS

Les actions de recherche du laboratoire MATIS ont essentiellement été définies lors du dernier Schéma directeur de la recherche.

Ces actions ont les titres suivants :

- *« restitution du bâti grande échelle »* ;
- *« modèle numérique de terrain moyenne échelle »* ;
- *« évaluation et comparaison »* : cette action prend essentiellement en compte la réalisation d'un site Web pour la mise à disposition de la communauté de données de référence ;
- *« détection de changement » ;*
- *« modélisation radiométrique des images »* ;
- *« interprétation conjointe carte-image »*.

En 2002, une nouvelle action de recherche va démarrer au laboratoire MATIS : « *Photogrammétrie architecturale* ». Cette action comportera deux volets : d'une part, la modélisation précise de sites de prestiges par utilisation conjointe de relevé laser terrestre (un appel d'offre est en cours pour l'achat d'un appareil) et de photogrammétrie terrestre, d'autre part, le développement de techniques permettant de constituer automatiquement, à partir de caméras embarquées sur un véhicule terrestre de bases de données de couples stéréoscopiques géo-référencés assurant une couverture systématique des façades d'un centre urbain. Le responsable cette action de recherche est Nicolas Paparoditis.

On voit donc que l'axe principal du laboratoire MATIS reste l'automatisation de la restitution en trois dimensions. Cet axe étant conjugué à différentes échelles : actions de recherche : « *modèle numérique de terrain moyenne échelle »,* « *Restitution du bâti grande échelle »* et « *Photogrammétrie architecturale* » (à très grande échelle).

En fait, à part « *Interprétation conjointe carte-image* », tous les axes de recherche du laboratoire MATIS interfèrent fortement avec la modélisation 3-D (des trois dimensions), même lorsque la restitution en 3-D ne fait pas partie de leur objectif premier :

- *les modélisations radiométriques en milieu urbain*, développées notamment pendant la thèse de Didier Boldo, nécessitent un travail spécifique sur le 3-D pour accéder à des informations telles que la correction des ombres portées, la proportion de ciel visible en chaque point, le rétro éclairement des façades etc. Les travaux de Gilles Martinoty, démarrés cette année, sur la modélisation de la réflectance bi-directionnelle (BRDF) nécessiteront, d'ailleurs, des modèles encore plus fins (utilisation systématique de la pente) ;
- « *Évaluation et comparaison* » contient, notamment, un aspect comparaison « laser/MNE de corrélation » et la mise à disposition de données de référence pour comparer, entre elles, différentes approches de photogrammétrie ;
- « *Détection de changements* » face à la difficulté de faire des comparaisons de radiométrie multi-dates, les recherches en détection de changements se sont surtout orientées sur des changements de relief. Par ailleurs, on ne pourra pas aborder de comparaisons radiométriques ou texturales fines sans données 3-D de précision permettant de modéliser les effets perspectifs des prises de vue.

Une cellule d'experts a été mise en place, il y a un an, avec pour objectif de mettre au profit des acteurs extérieurs (essentiellement institutionnels), les compétences développées au laboratoire MATIS. Cette cellule a travaillé, cette année, essentiellement pour la DGA et le CNES (de manière à peu près égale) avec quelques actions dans le cadre de contrats européens. L'essentiel de ces contrats a porté sur la production de données 3-D dans des contextes différents de celui de l'IGN. Quelques actions ont aussi porté sur l'utilisation de données 3-D.

En conclusion, nous pouvons dire que la ligne directrice du laboratoire MATIS reste le 3-D et qu'il n'y a pas lieu de la remettre fondamentalement en cause, car il s'agit d'un des points forts reconnus du laboratoire. Nous essayons cependant de diversifier cette orientation en cherchant à ce que les actions qui valorisent le 3-D prennent une part aussi importante que celle qui s'occupe de production 3-D. Par ailleurs, un effort important est fait pour capitaliser et valoriser, de manière externe, ce qui a déjà été développé en production de données 3-D : développement d'une maquette d'intégration des algorithmes, collaboration avec le CNES dans le cadre d'une thèse visant à transposer au contexte spatial les algorithmes développés dans le contexte aérien, existence d'une cellule d'experts permettant d'exporter en dehors de l'IGN, les travaux réalisés dans ce domaine.

Thèses

Thèses soutenues en 2001

- [DE JOINVILLE 01] Olivier de Joinville *: Évaluation de la qualité d'une cartographie urbaine à l'aide d'images aérienne à haute résolution*, thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, directeur de thèse : Henri Maître, spécialité : Signal et Images, soutenue le 26 mars 2001 avec la mention « très honorable », laboratoire MATIS, IGN-SR-01-003/C-THE-ODJ, 2001.
- [FUCHS 0] Frank Fuchs : *Contribution à la reconstruction du bâti en milieu urbain, à l'aide d'images aériennes stéréoscopiques à grande échelle. Étude d'une approche structurelle,* thèse de l'Université Paris-5, René Descartes, directeurs de thèse : Georges Stamon & Hervé Le Men, discipline : Sciences de la Vie et de la matière, soutenue le 27 avril 2001 avec la mention « très honorable », avec félicitations du jury, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-001/C-THE-FF, 2001.
- [JUNG 01] Franck Jung : « *Comparaison entre Couples Stéréoscopiques de Dates Différentes pour la Détection de Changements Topographiques*. », thèse de l'École Polytechnique, directeur de thèse : Alain Trouvé, spécialité : Mathématiques Appliquées, soutenue le 2 novembre 2001 avec la mention « très honorable », laboratoire MATIS, IGN-SR-01-0007/C-THE-FJ, 2001.

Thèses en cours

La soutenance des thèses suivantes est prévue avant la fin de l'année 2002 :

- thèse de Jocelyn Marchadier : « *Modélisation fonctionnelle et topologique pour la vision par ordinateur, application au relèvement de cliché urbain* », soutenance prévue en avril 2002 ;
- thèse d'Hassan Jibrini : « *Reconstruction de modèles de bâtiments à partir de données cadastrales vectorisées et d'un couple d'images aériennes à haute résolution* », soutenance prévue en avril 2002 ;
- thèse de Didier Boldo commencée en décembre 1998, sur la modélisation radiométrique, soutenance prévue en juin 2002 ;
- thèse de Laurent Guigues sur la lecture couplée carte-image et la segmentation ;
- thèse de Sébastien Drot sur les modèles de Markov objet en segmentation d'images aériennes.

Les thèses de Franck Taillandier et Laurent Garcin, commencées en début 2001, se déroulent sans problème particulier.

Nouvelles thèses

Trois thèses commencent cette année au laboratoire :

- thèse de Nesrine Chehata, en collaboration avec le CNES, sous la direction du Professeur G. Stamon (Paris V) sur le sujet « Interprétation de scène en milieu urbain avec une approche conjointe des thèmes bâti et routier» ;
- thèse de Gilles Martinoty, sous la direction d'Hervé Le Men et Stéphane Jacquemoud sur la télédétection en milieu urbain à très grande échelle par modélisation de la réflectance bi-dimensionnelle ;
- thèse de Frédéric Bretar, sous la direction de Michel Roux et Marc Pierrot Deseilligny sur l'utilisation conjointe « laser/photogrammétrie » (début septembre 2002).

Stages

En 2001, le laboratoire a accueilli sept stagiaires. Ce sont tous des stages de fin ou de milieu d'école d'ingénieur. En effet, la période à laquelle a été faite la diffusion des stages n'a pas permis de contacter de stagiaires de DEA.

Publications du laboratoire MATIS

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

A.3 Les travaux du Laboratoire OEMI

Christian Thom (responsable du thème Instrumentation)

Résultat de recherches du Laboratoire OEMI pour 2001

Mouvements de personnel

Le Laboratoire OEMI comprend quatre permanents IGN :

- un Chef de laboratoire ;
- deux ingénieurs ayant des spécialités en optique, électronique et mécanique ;
- un électronicien ;
- un enseignant-chercheur extérieur est accueilli.

En général, un thésard peut être accueilli, comme c'est le cas en ce moment.

Thierry Duquesnoy, chercheur, a changé d'affectation en cours d'année et n'a pas encore été remplacé.

Résultats pour l'axe photogrammétrie

Amélioration et exploitation des caméras numériques

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

Après la réalisation d'un prototype de caméra panchromatique, les années passées, et d'un autre basé sur un capteur couleur, puis en 2000 celle d'une caméra à canaux multiples, c'est-à-dire de plusieurs caméras synchronisées permettant d'obtenir des images en vraie couleur, l'année 2001 a principalement été consacrée à l'industrialisation des caméras suivant les recommandations du Projet « industrialisation de la caméra numérique » et à l'équipement des caméras en capteurs 4k x 4 k « KAF 16801 LE », fruits de nos relations avec KODAK.

La collaboration engagée, d'une part, avec le CNES et l'ONERA, dans le cadre de leurs simulations d'images haute résolution a abouti à la création d'un protocole débouchant sur la mise à disposition du CNES d'un système à quatre canaux. Par ailleurs, la collaboration lancée avec l'industriel ZEISS/INTEGRAPH, dans le cadre de la réalisation et des essais de leur propre capteur numérique est un peu en sommeil. Coût total : 1 330 kF pour dix-sept mois-homme.

Résultats pour l'axe métrologie-positionnement

Altimétrie GPS

Pour une présentation générale des problèmes de la composante verticale du GPS, se reporter au paragraphe du laboratoire LAREG, pages 13 à 30. Ici, on ne s'intéressera qu'à la partie instrumentale de la question, c'est-à-dire à la détermination de l'instrumentation extérieure au récepteur GPS, nécessaire à l'amélioration de la précision verticale des résultats. Les solutions envisagées incluent les radiomètres à vapeur d'eau, le LIDAR, etc.

Après les simulations réalisées en 2000 montrant la réalité du problème, la construction du LIDAR a été entreprise et un prototype a été testé lors de l'expérimentation ESCOMPTE, en mai-juin 2001. Les résultats en cours d'analyse sont encourageants. Un protocole de collaboration avec le Service d'Aéronomie (Université Pierre et Marie Curie, France), est en cours d'élaboration, faisant suite au changement de statut du responsable de la recherche : Olivier Bock. Cette action de recherche est le sujet de thèse de Jérôme Tarniewicz.

Télémètre LASER aéroporté

Cette action de recherche a pour but : la mise au point d'un télémètre LASER aéroporté à grand champ, pour la surveillance des mouvements verticaux du sol sur des zones assez étendues. Cette méthode originale a été développée à l'IGN, avec, au début, une participation de la Société Elf-Aquitaine (P). Après des campagnes de mesures terrestres en 1995 et deux campagnes aériennes en 1998 et en 2000, l'année 2001 a vu, elle aussi, sa campagne aérienne sur le même site qu'en 2000. Bien que les données n'aient pas été encore totalement exploitées, le système a été jugé suffisamment avancé dans son développement pour être passé à un service de production de l'IGN pour son exploitation, même s'il reste encore des développements à réaliser pour le rendre totalement opérationnel.

Conclusion

En conclusion, nous pouvons constater que les recherches menées au Laboratoire OEMI passent en production, même si c'est avec des difficultés passées et prévisibles. Ce point positif nous conforte dans notre principe de mener nos recherches dans des domaines plus applicatifs que théoriques.

Publications du Laboratoire OEMI

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

A.4 Les travaux du laboratoire COGIT

Anne Ruas (responsable du thème Information géographique & cartographie)

Valorisation de la recherche

Études effectués en 2001

- Projet Européen *MurMur* : le laboratoire COGIT est partenaire de ce projet du programme IST qui propose un modèle de données ayant des capacités d'intégration de plusieurs représentations de l'espace. Le projet a développé une interface graphique de conception de schémas selon ce modèle, couplée à un traducteur créant le schéma correspondant pour le SGBD Oracle. Un éditeur de requêtes est en cours de développement.
- Études pour la DGA avec MSI sur la *conception d'un serveur multi-échelles*.

Études déjà contractualisées pour 2002

- Suite et fin en mai 2002 du projet européen *MurMur*. Il s'agit de tester l'éditeur de requêtes sur des données de l'IGN et de proposer une application simple utilisant les capacités **multi-représentations** du système.
- Démarrage en Juin 2002 d'un nouveau projet Européen *SPIRIT* dont le but est de développer un moteur de recherche de données géographiques sur le WEB. Le COGIT participera aux tâches relatives aux métadonnées et aux ontologies dans le cadre des recherches faites dans l'action de recherche sur la consultation. (appel d'offre du 17 octobre 2001 (5ème PCRD, IST 2001))

Études possibles

Collaboration avec EADS pour la réponse à l'appel d'offre ENVOL proposé par la DGA sur l'intégration et l'accès à des données hétérogènes. Le COGIT se focaliserait sur les états de l'art en multi-échelles et sur les problèmes liés à l'accessibilité.

Participation à différents réseaux d'excellence (REX) dans le cadre du 6^{ième} PCRD : GINET (avec le GDR SIGMA); Quality-aware-GIS; 4S (analyse spatiale) et ANDIAMO (développement durable).

Les actions de recherche du laboratoire

La gestion des évolutions

Cette action de recherche vise à mieux savoir traiter les données d'évolution dans les bases de données géographiques:

- mieux modéliser les bases de données afin d'assurer la cohérence des bases lors de l'intégration des mises à jour (thèse, Hakima Kadri) ;
- constituer des modèles d'évolution à partir de données d'évolution élémentaire et de modèles généraux afin, d'une part, de mieux visualiser les évolutions et, d'autre part, d'analyser les évolutions induites (thèse, Patricia Bordin)

Dans le cadre de cette action de recherche, une nouvelle plate-forme de recherche - Oxygène - basée sur des AGL, une modélisation de classes et de méthodes en JAVA et un stockage des données sous Oracle est en cours de conception (Thierry Badard, Arnaud Braun). Cette plate-forme sera partagée pour les actions de recherches sur les évolutions, l'unification et les risques.

La consultation de données géographiques sur réseau

Cette action de recherche vise à faciliter l'accès à l'information géographique via Internet. En 2001, les recherches sont réalisées dans le cadre de thèses de doctorat :

- structuration des ressources (tâches et métadonnées géographiques) afin de proposer à un utilisateur un plan (ou mode d'emploi) pour atteindre ses objectifs géographiques (Bénédicte Bucher, thèse soutenue en Juin 2002)
- conception d'une interface permettant de spécifier des besoins en paramétrisation algorithmique à l'aide d'outils de dialogue homme machine et d'échantillons géographiques prétraités (Frédéric Hubert),
- Utilisation de schémas de données comme moyen graphique pour formuler des requêtes géomatiques sur des bases distantes structurées (Stéphane Pelle, thèse réalisée à l'ENSG)

L'unification des bases de données

Cette action de recherche a pour objectif de modéliser conjointement des bases de données géographiques, de contenu et de précision différents, pour réduire les coûts de gestion et de mise à jour de ces bases. Il s'agit donc d'éviter la redondance d'information et de relier des représentations différentes d'un même espace géographique. Pour cela, les modèles de données et les outils de gestion et de requêtes doivent être repensés et enrichis. Deux nouvelles thèses ont débuté en 2001 :

- interprétation des différences entre données appariées : détection d'erreurs et formalisation plus précise des écarts (David Sheeren)
- identification des concepts fédérateurs entre bases de données (Nils Gesbert)

Pour ces deux thèses, un premier travail est basé sur la formalisation sous formes d'objets des spécifications de saisie et de représentation des bases de données. De plus cette action de recherche intégrera les algorithmes d'appariement du COGIT (Sébastien Mustière).

La gestion des risques

Il s'agit de savoir mieux modéliser et utiliser les données géographiques pour étudier la gestion du risque :

- propagation des erreurs sur les données lors de traitements SIG (Olivier Bonin, thèse soutenue en Janvier 2002)
- étude de la vulnérabilité du réseau routier (Jean-François Gleyze)
- mise en cohérence des éléments planimétriques (routes, bâtiments) sur des MNT. Etude de l'incertitude induite (Frédéric Rousseaux, thèse financée par la DGA)
- modélisation 3D et calcul d'intervisibilité (Fabien Ramos, thèse CIFRE-Matra pour la CEGN)

La généralisation des bases de données

Parallèlement à l'enrichissement des outils d'analyse spatiale pour la généralisation (détection de structures, mesure de forme), deux aspects sont étudiés dans le cadre de thèses de doctorat :

- ajout du mécanisme de négociation aux agents géographiques pour la généralisation de zones rurales (Cécile Duchêne)
- méthodologie d'évaluation de données généralisées (Sylvain Bard).

Les recherches de cette action de recherche sont réalisées sur le logiciel LAMPS2 de Laser-Scan Limited.

Étude cartographique

Cette étude, réalisée par Jenny Trévisan, vise à étudier les possibilités d'automatisation de représentations cartographiques (1 : 25 000 et 1 : 50 000) à partir de la base de données BDPays, en se basant sur les outils de généralisation disponibles : prototype AGENT, algorithme de généralisation de l'occupation des sols, etc. En 2001, les études se sont concentrées sur la réalisation de différents 1: 25 000 (méthode, contenu qualitatif, sémiologie).

A.5 Les travaux du laboratoire LAREG

Michel Kasser (responsable du thème Géodésie)

Introduction

En 2001, le laboratoire LAREG a généralement poursuivi ses activités dans ses quatre domaines habituels de recherche : Systèmes de références, Géodésie spatiale, Géodynamique et Géodésie physique.

Ces quatre domaines ont connu des évolutions différentes qui transparaissent largement dans les différents articles inclus dans le présent article : Zuheir Altamimi pour les Systèmes de référence, Martine Feissel en Géodésie Spatiale, Marie-Noëlle Bouin et Jean-Mathieu Nocquet en Géodynamique et Olivier Jamet en Géodésie physique.

Effectifs du laboratoire en 2001

Dans les différents domaines de recherche évoqués ci-dessus, les effectifs du laboratoire LAREG se répartissent de la manière suivante à la fin 2001 :

***tableau A.5.1** : effectifs du laboratoire LAREG en 2001*

Systèmes de références	Z. Altamimi P. Sillard	chercheur chercheur	ITGCE ITGCE
Géodésie spatiale	M. Feissel M. Kasser M. Laplanche K. Le Bail M. Sammuneh	chercheur chercheur chercheur thésarde thésard	astronome à l'Observatoire de Paris observateur à l'OCA
Géodynamique	M.-N. Bouin J.-M. Nocquet	chercheuse thésard	IG ITGCE
Géodésie physique	O. Jamet B. Langellier	chercheur ingénieur	ICG ITGCE, BGI, Toulouse
Secrétariat	C. Gardère		

Les évolutions au cours de l'année 2001 ont été : le départ de Didier Maillard (ITGCE) ainsi que l'arrivée de Karine Le Bail.

Points importants de 2001

Parmi les points majeurs, on notera le calcul et la publication de l'ITRF 2000, en début d'année. L'accord avec CLS, signé en cours d'année, est d'ailleurs la base d'une diffusion scientifique de CATREF, logiciel de synthèse de solutions globales développé par Zuheir Altamimi et Patrick Sillard, qui est l'outil de base des calculs ITRF.

Par ailleurs, l'accord de travail avec l'Université de Berne pour le traitement de l'observable DORIS et les travaux menés par K. Le Bail sont également des éléments importants de l'année 2001. Et, quoique ces travaux se soient largement déroulés à l'Observatoire de la Côte d'Azur, les succès récents de la station laser ultra mobile en 2001 rejaillissent aussi sur l'IGN, qui a participé, pour une large part à sa conception et à certaines phases de son développement, commencé en 1989.

Enfin, concernant la géodésie spatiale, Pascal Willis a débuté une mission de longue durée au *Jet Propulsion Laboratory* (JPL, NASA, Pasadena, Californie) dans le cadre d'un accord de collaboration de trois ans, portant principalement sur les traitements de mesures DORIS.

Actions de recherche du laboratoire LAREG

ITRF2000 *(Zuheir Altamimi, Patrick Sillard & Claude Boucher)*

Cette action est développée au chapitre B.9 de ce bulletin.

Études de géodésie spatiale *(Martine Feissel & Michel Kasser)*

Extension du logiciel bernois de géodésie spatiale au traitement des données DORIS

Le groupe de géodésie spatiale de l'Institut Astronomique de l'Université de Berne (AIUB) développe et exploite un logiciel de traitement géodésique des données GPS (connu sous le nom de « Bernese Software ») qui est aussi diffusé dans de nombreux laboratoires utilisateurs. Une heureuse conjonction d'intérêts a permis d'intéresser ce groupe à l'implantation dans ce logiciel des éléments nécessaires au traitement des données DORIS.

Les intérêts du côté de l'IGN sont le développement de compétences et de collaborations supplémentaires au laboratoire LAREG, ainsi que l'extension du rayonnement du système français DORIS, dont le réseau terrestre mondial est maintenu par l'IGN. Du côté de l'AIUB, cette nouvelle capacité est de nature à renforcer leur position comme centre d'analyse des données de Jason1. Du fait de la limitation de leurs moyens humains, ce développement ne pouvait être envisagé sans une contribution extérieure, qui est apportée par K. Le Bail dans le cadre de sa thèse. Notons la qualité de l'encadrement apporté par les chercheurs de l'AIUB à ce projet. K. Le Bail a participé activement aux développements lors d'un séjour de dix mois (juillet 2001-avril 2002) à l'AIUB.

Ce séjour a été précédé et accompagné pour elle de visites à plusieurs laboratoires de géodésie spatiale (le CERGA à Grasse, le GRGS, le CNES et CLS à Toulouse), ce qui lui a permis d'établir avec diverses équipes de recherche les contacts indispensables à l'accomplissement de sa mission.

Les différentes étapes du développement ont été les suivantes :

- prise de connaissance du logiciel : références, notations, règles internes de programmation, par exemple le rôle des fichiers d'interface et la création des panneaux de l'interface utilisateur ;
- afin de sérier les actions, il avait été décidé de mettre de côté dans un premier temps l'estimation d'orbite (objet d'un autre programme de recherche à l'AIUB), pour se concentrer sur la modélisation de la fonction de mesure et son positionnement informatique dans la chaîne de traitement déjà définie pour les données GPS. Ayant importé des orbites calculées par d'autres centres d'analyse DORIS, on a modifié le format des fichiers externes afin de les aligner aux standards du logiciel bernois. En parallèle, une étude exploitant un nouvel outil (les pulses stochastiques) sur les orbites du satellite TOPEX/POSEÏDON a conduit à un meilleur traitement des manœuvres du satellite ;
- une fois les orbites introduites dans le logiciel, il devient possible de traiter les mesures DORIS. Devant les difficultés à obtenir des mesures brutes, il fut décidé de recourir à des mesures simulées. Ce travail s'est avéré être une excellente approche, car il permet de s'assurer que l'ensemble des éléments de la mesure a bien été compris. La fonction de mesure est modélisée à partir des notions d'ambiguïtés du système GPS. On introduit tout d'abord une modélisation « primaire », qui permet l'estimation de paramètres non spécifiques à DORIS (coordonnées de stations, paramètres de troposphère…) à partir des mesures simulées ;
- la dernière étape, restant à réaliser en mars-avril 2002, consiste à introduire des mesures DORIS réelles et à estimer des paramètres spécifiques à DORIS (fréquences, par exemple).

Applications temps réel du GPS

L'existence d'un réseau GPS permanent sur un territoire donné permet de réaliser un positionnement en temps réel à l'aide de récepteurs mobiles mis en station pour des sessions d'observation de courte durée. M.A. Sammuneh a commencé en décembre 2000 une thèse portant sur le positionnement de précision en temps réel s'appuyant sur un réseau GPS national

L'année 2001 a été consacrée à le recherche bibliographique sur les éléments environnementaux au sens large : troposphère, ionosphère, avec l'analyse de mesures horaires du contenu électronique de l'ionosphère, étude la stabilité des horloges.

Groupement de Recherches AGRET (http://lareg.ensg.ign.fr/AGRET)

Outre l'organisation d'un colloque qui s'est tenu à Strasbourg du 5 au 7 novembre 2001, l'activité principale du GDR en 2001 a été la rédaction et la diffusion d'un « Manifeste pour l'observation géodynamique ». L'accessibilité

grandissante des techniques de géodésie spatiale au cours de la dernière décennie a favorisé le développement d'études géophysiques à l'aide de ces techniques. Un domaine de recherche important s'est ainsi développé, à la jonction entre plusieurs domaines classiques, avec des contraintes particulières sur le recueil des observations et une demande nouvelle de profils de chercheurs.

Ces contraintes et ces profils se sont avérés difficiles à classer dans les catégories existantes. Le « Manifeste », rédigé par vingt auteurs de onze établissements, recense les spécificités de la recherche s'appuyant sur l'observation géodésique, il met en lumière les résultats obtenus et formule une série de recommandations visant à renforcer et pérenniser les dispositifs d'observation dans lesquels la France a des responsabilités.

Stabilité du repère de référence extragalactique et mesure de la précession-nutation de la Terre

En collaboration avec l'Observatoire Royal de Belgique et le Goddard Space Flight Center (USA), une étude a été menée conjointement sur l'influence de l'atmosphère sur la nutation, et sur l'impact de la stabilité du repère céleste sur l'estimation par VLBI de la précession et de la nutation. La précision des mesures VLBI est de l'ordre de dix microsecondes de degré. L'étude a montré que les effets atmosphériques sont détectés par le VLBI, mais que les instabilités du repère de référence céleste influencent l'estimation des effets à long et moyen terme de la précession-nutation à un niveau comparable à celui des écarts résiduels entre le modèle IAU2000 et les observations.

Mesure des déformations par GPS *(Marie-Noëlle Bouin, Jean-Mathieu Nocquet & Guy Wöppelmann)*

Cette action de recherche était centrée sur l'étude de la déformation sur la France et l'Ouest Européen à partir de l'outil GPS, et en particulier des réseaux permanents GPS mis en place depuis cinq ans sur l'Europe, la France et les Alpes. On peut distinguer deux sous-domaines d'études.

Le premier concerne la mesure de la déformation tectonique sur les Alpes et l'Europe occidentale, il s'agit de la fin de la thèse de Jean-Mathieu Nocquet. Le second fait appel aux données du réseau permanent français (RGP) pour la mesure des effets de surcharge océanique sur les côtes atlantiques. À ces deux thèmes principaux vient s'ajouter la mise en place, en collaboration avec l'Université de la Rochelle, d'un centre de données et d'analyse des stations GPS permanentes pour la surveillance de l'évolution mondiale du niveau de la mer.

Mesure de la surcharge océanique par GPS permanent

La situation géographique du RGP, et en particulier les stations de Brest, Biarritz et Chizé situées près de la façade atlantique, lui confère un grand intérêt pour la mesure des déformations de la croûte terrestre sous l'effet des marées océaniques.

La Bretagne est l'une des régions dans le monde où ce type de mesure est d'un apport majeur pour l'amélioration des modèles : l'amplitude des marées océaniques y est suffisante pour que l'effet sur la composante verticale soit détectable aisément par GPS, et la complexité des effets de marées liés à la topographie de la côte et à la bathymétrie justifie une amélioration des modèles.

L'intérêt d'utiliser les données de stations permanentes était ici double : d'une part, on assure la qualité et la stabilité des données sur le long terme, d'autre part, on dispose de séries de longue durée sur lesquelles on peut utiliser les outils classiques de traitement du signal. Cette étude a été menée en collaboration avec l'Université de la Rochelle, pour la compréhension des phénomènes de marées et des différents modèles, ainsi que pour la partie traitement du signal. La méthodologie de traitement a été adaptée en fonction des signaux mesurés : périodes principales proches de 12 heures et 24 heures, composante principale sur la verticale, amplitude allant jusqu'à 8 cm.

Un effort tout particulier a été apporté à la modélisation et l'estimation des paramètres troposphériques, qui peuvent influencer l'estimation de la composante verticale GPS.

On peut résumer ainsi les principaux résultats :

- le signal de surcharge océanique est mesuré sur les trois composantes des stations du RGP, avec une précision de 3 à 5 mm sur les composantes planimétriques, 5 à 8 mm sur la verticale ;
- ce signal est globalement en très bon accord avec les modèles, en amplitude, périodes et phase, aussi bien sur les composantes horizontales que verticale. En particulier, les périodes principales correspondant aux ondes semi-diurnes lunaire (M2, 12 h 25), solaire (S2, 11 h 58) et de nutation (N2-K2, 12 h 40) sont présentes et distinctes. Les amplitudes mesurées de ces différentes ondes sont égales en moyenne à 80% de celles données par les modèles ;
- on remarque une exception notable à Brest, sur la composante Est, où un décalage de phase (en avance) de 2 h 35 est observé entre la mesure GPS et l'ensemble des modèles de surcharge. Ce décalage nécessite de plus amples investigations, dans la mesure où il ne trouve pour l'instant pas d'explications, ni du côté du GPS ni de celui des modèles ;
- un traitement pour la mesure de la surcharge (par exemple : avec des sessions de 2 à 4 heures) et l'estimation de paramètres troposphériques toutes les trente minutes ou plus fréquemment, suffit à décorréler les variations de la troposphère de celles de l'altitude de la station GPS ;

- par contre, le calcul de sessions de 24 heures pour l'estimation de l'humidité troposphérique nécessite quelques précautions : les déformations verticales liées à la marée, de période proche de 12 heures, vont être moyennées sur la session. Si l'on n'utilise pas de modèle de surcharge dans l'inversion GPS, les variations de hauteur vont se reporter sur les retards troposphériques, qui sont eux estimés toutes les 30 minutes. Le coefficient théorique de ce report est de 0,24, alors que l'on obtient dans cette étude 0,29. Cela signifie qu'un calcul par session de 24 heures pour la mesure de l'humidité atmosphérique en France doit impérativement inclure un modèle de marée, sous peine d'introduire un biais allant jusqu'à 2,5 cm à Brest dans le retard troposphérique.

Hormis les résultats scientifiques obtenus, en ce qui concerne la modélisation de la marée en Bretagne, cette étude apporte des informations sur l'influence de la surcharge sur un traitement GPS. Sur des longues lignes de base, et avec une session de quelques heures, on peut avoir sur la verticale un biais allant jusqu'à 3 à 5 cm.

Avec des sessions de 24 heures, l'utilisation d'un modèle de marée océanique est le seul moyen d'éviter un biais sur les paramètres troposphériques. Cette étude doit se poursuivre sur deux aspects : étude de l'effet de repliement de spectre dans un traitement GPS de longue durée, investigations du côté des modèles afin d'expliquer le décalage de phase observé à Brest.

Mesure de la déformation tectonique en Europe occidentale

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse sur les réseaux GPS permanents, en collaboration avec l'UMR Géosciences Azur (Nice, Sophia-Antipolis) en charge du réseau permanent sur les Alpes occidentales (REGAL) et l'Université de Purdue (USA), sous la direction d'Eric Calais.

L'Europe occidentale est un domaine continental appartenant à l'intérieur stable de la plaque Eurasie. Cependant, des structures intra-plaques comme le graben du Rhin présentent une sismicité instrumentale et historique significative, indiquant que cet intérieur de plaque n'est pas parfaitement rigide. Une estimation quantitative de la déformation à travers ces structures n'est toujours pas disponible.

Au Sud de ce domaine, les chaînes alpines (Bétiques, Pyrénées, Alpes, Apennins, Dinarides, chaînes du Maghreb) et les bassins de Méditerranée occidentale (bassin Algéro-Provençal, mer Ligure et Tyrrhénienne) constituent la zone de frontière de plaque accommodant la convergence entre les plaques Afrique et Eurasie en Europe.

La distribution de la sismicité met en évidence l'existence de zones de déformation entourant des blocs quasi-asismiques, généralement interprétés comme rigides. La cinématique de ces blocs, ainsi que la vitesse de convergence entre les plaques Afrique et Eurasie restent, pour une grande part, à estimer. De plus, la faiblesse des déformations, les longs temps de récurrence des grands séismes dans cette région rendent les indicateurs sismologiques et géologiques de la déformation difficiles à obtenir et à interpréter avec fiabilité.

L'objet du travail est la détermination et l'analyse d'un champ de vitesses, cohérent et précis au niveau de 1 mm/an, couvrant l'Europe et la Méditerranée occidentale, densifié sur des zones d'intérêt géophysique comme les Alpes et le fossé rhénan. Pour atteindre ce résultat, des méthodes d'estimation des vitesses à partir des résultats des réseaux GPS permanents et de combinaison de solutions géodésiques ont été utilisées et adaptées.

Ces méthodes sont basées sur la combinaison de jeux de coordonnées positions/vitesses, développée au laboratoire LAREG dans le cadre de la recherche sur la réalisation des systèmes de référence terrestre. Elles permettent l'expression des résultats de différents réseaux géodésiques dans un champ de vitesses unique et cohérent, en traitant le problème de la définition du système de référence géodésique de manière rigoureuse. Elles fournissent, par ailleurs, une estimation réaliste des erreurs associées aux vitesses.

Un premier champ de vitesses a été déterminé à partir de la combinaison des résultats :

- des sites les mieux déterminés de l'ITRF ;
- du réseau GPS permanent européen EUREF ;
- du réseau géodésique GPS permanent français RGP ;
- du réseau GPS permanent REGAL sur les Alpes occidentales. Le niveau d'accord entre les solutions géodésiques issus de ces quatre jeux de données est meilleur que 1 mm pour les composantes horizontales (rms 0,6) et 1-3 mm pour la composante verticale (rms 2,4). L'accord sur les vitesses horizontales est meilleur, de l'ordre de 0,3 mm/an (rms).

Les vitesses de soixante-quatre sites ont ainsi été obtenues avec une précision de l'ordre de 1 mm/an ou mieux. Dans une deuxième étape, ces résultats ont été densifiés en incluant des mesures de campagnes réalisées dans les Alpes occidentales, le Jura et le fossé rhénan, et les données du Réseau de Référence Français (RRF). Au total, cent trente cinq sites ont ainsi été déterminés en Europe.

Cette combinaison indique une compatibilité des solutions issues des campagnes RRF de l'ordre de 1 cm avec les résultats issus des réseaux permanents lorsque les contraintes de définition de système de référence sont traitées simultanément pour l'ensemble des solutions.

Une méthode d'analyse du champ de vitesses a ensuite été développée pour évaluer le niveau de rigidité de l'intérieur des plaques tectoniques et pour la détection des très faibles déformations. Cette méthode s'appuie sur une analyse statistique du champ de vitesses permettant la recherche de la meilleure définition possible d'un référentiel des vitesses en vue de l'interprétation tectonique. Appliquée aux champs de vitesses précédemment obtenus, elle indique une borne supérieure de la déformation possible à travers le graben du Rhin de 0,6 mm/an.

L'Europe Centrale (Nord des Alpes et des Carpates, Ouest du graben du Rhin) présente un niveau de rigidité meilleur que 0,4 mm/an et ne montre aucune évidence de mouvements significatifs horizontaux liés au rebond post-glaciaire. Les sites géodésiques situés en Europe Centrale permettent donc de définir un référentiel dans lequel les vitesses résiduelles en Europe et Méditerranée peuvent être représentées avec un biais minimum.

Les points situés au Sud de la Méditerranée occidentale et susceptibles d'appartenir à la plaque Afrique suggèrent une vitesse de convergence Afrique/Eurasie en Europe de 30 à 50% plus faible que celle prédite par le modèle NUVEL1A, basé sur des observations géologiques. Ce résultat est confirmé par l'étude d'une solution GPS globale, incluant des sites géodésiques sur l'ensemble de la plaque Afrique.

Par ailleurs, l'Espagne, la Méditerranée occidentale et le bloc Corso-Sarde semblent être solidaires de l'Europe. Ce résultat indique que le raccourcissement lié à la convergence Afrique/Europe est principalement absorbé dans les chaînes du Maghreb.

Les données géodésiques confirment la rotation anti-horaire du bloc Adriatique par rapport à l'Europe stable autour d'un pôle situé dans la plaine du Pô. Cette rotation implique une extension de 3-5 mm/an dans les Apennins et un raccourcissement de l'ordre de 4 mm/an dans les Dinarides. Les Alpes centrales sont en raccourcissement Nord-Sud à une vitesse de 2 mm/an. Le bassin Pannonien présente un faible niveau de déformation mais les sites les plus méridionaux suggèrent une extension de l'ordre de 1-2 mm/an.

Dans les Alpes occidentales, le réseau REGAL permet d'obtenir une image plus détaillée du champ de déformation. Les mouvements dans l'arc alpin ne dépassent pas 1,5 mm/an. Les vitesses indiquent un régime de déformation combinant décrochement dextre et extension localisée dans le cœur de la chaîne, en accord avec les mécanismes au foyer récemment publiés. Dans la partie sud des Alpes occidentales et en Provence, le régime est dominé par le raccourcissement NS à NO-SE.

Cette figure de déformation, avec celle des Alpes centrales, des Apennins et des Dinarides permet de proposer que la déformation de ces régions est contrôlée par la rotation anti-horaire du bloc Adriatique. Enfin, des simulations numériques suggèrent que, dans un contexte de très faible convergence ou de légère extension, la contribution des forces de volume liées à la topographie de la chaîne alpine occidentale est suffisante pour générer de l'extension dans le cœur de l'arc alpin occidental.

Mise en place d'un centre de calcul GPS pour la surveillance du niveau de la mer

Cette action de recherche, en collaboration avec l'Université de la Rochelle, s'inscrit dans le cadre du projet TIGA de l'IGS. Il s'agit de mettre en place un serveur de calcul hebdomadaire des stations GPS permanentes du réseau IGS et d'autres réseaux situées à proximité de marégraphes.

Le but final est d'obtenir, par le biais des marégraphes du réseau SONEL et des GPS qui y sont rattachés, une mesure de l'évolution du niveau de la mer exprimée dans un système de référence terrestre unique. Cela doit permettre, entre autres, de dissocier les effets locaux liés aux mouvements de la croûte (que l'ont peut mesurer par GPS) des effets réels de variation du niveau de la mer. À terme, le projet comprend le traitement rétroactif d'une partie des données existantes depuis plusieurs années.

L'enjeu est à la fois méthodologique, concernant :

- le traitement GPS lui-même, avec la prise en compte de tous les effets millimétriques pouvant affecter la mesure sur la verticale ;
- la stratégie de traitement et de combinaison puisqu'on a affaire à un réseau mondial de plus de cent sites, et scientifique. Du côté des intérêts scientifiques, on peut distinguer l'établissement de références verticales terrestres connectées de manière très précise avec les marégraphes, et la mesure continue de différents effets géophysiques sur la composante verticale : stabilité locale, effets de surcharge océanique à long terme, effets troposphériques, surcharge atmosphérique, variations hydrologiques. Le logiciel de calcul a été installé, la procédure de calcul définie, et des calculs tests ont été effectués.

Géodésie physique : champ de pesanteur et nivellement *(Olivier Jamet & Patrick Sillard)*

Cette action est développée au chapitre B.9 de ce bulletin.

B. Quelques actions marquantes

B.1 Trois approches pour la construction automatique de modèles 3-D de bâtiments en imagerie aérienne haute résolution

Cet article est une reproduction d'un article soumis au bulletin de la « Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection » (SFPT) dans le cadre d'un numéro spécial sur les journées scientifiques de l'ONERA (JSO). Il est reproduit ici avec l'aimable autorisation de la SFPT, ce dont nous tenons à la remercier.

Frank Fuchs, Hassan Jibrini, Grégoire Maillet, Nicolas Paparoditis, Marc Pierrot Deseilligny et Franck Taillandier

Résumé

Le problème de la construction automatique de modèles 3-D grande échelle de bâtiment par photogrammétrie aérienne est un des axes de recherche majeurs du laboratoire MATIS. Il est considéré comme suffisamment important pour que trois approches, correspondant à trois configurations opérationnelles différentes, aient été développées : une approche grammaticale partant d'un seul couple stéréoscopique, une approche par extraction de primitive 3-D multi-stéréoscopique en utilisant la redondance des points de vues multiples et une approche par calcul de surface polyédrique optimale utilisant un couple stéréoscopique et une base de donnée cadastrale. Cet article présente ces trois approches de manière indépendante et évoque les possibilités futures de fusion de ces approches.

Introduction

Le laboratoire MATIS travaille depuis son origine sur la restitution automatique de modèles 3-D à partir de données stéréoscopiques. Il y a quelques années, il est clairement apparu que les modèles-grille de la forme z = f (x,y) (modèle raster) obtenus par mise en correspondance classique, satisfaisants pour les applications petites échelles et le milieu rural, étaient inadaptés au contexte urbain pour les raisons suivantes :

- cette représentation ne convient pas aux applications potentielles telles que la réalité virtuelle, la simulation etc …
- cette représentation est inadaptée aux formes de la plupart des bâtiments (type polyèdre);
- les très grandes échelles nécessaires en milieu urbain rendent les représentations maillées particulièrement lourdes.

Inversement, la restitution automatique de modèles 3-D de bâtiments, sous forme polyédrique, est un problème très difficile sur lequel de nombreuses équipes travaillent (ou ont travaillé) depuis plusieurs années [HENRICSON et al 99].

Face à la difficulté du problème, le laboratoire MATIS a exploré, en parallèle, trois voies différentes correspondant à trois configurations opérationnelles différentes :

- une approche par appariement de modèles paramétriques dans le cadre de la thèse de Frank Fuchs [FUCHS 01]. Cette approche est la plus ambitieuse des trois, puisque les données en entrée sont réduites au minimum pour faire de la stéréovision (un couple d'image) ;
- une approche par stéréo multi-vues (les points-terrain sont vus typiquement dans six images), dans le cadre de la thèse de Franck Taillandier. Cette approche est celle des trois donnant aujourd'hui les modèles les plus détaillés ;
- une approche par mise en 3-D de données 2-D (typiquement du cadastre), dans le cadre de la thèse d'Hassan Jibrini. Cette approche est celle des trois la plus proche d'une application opérationnelle.

Approche appariement de modèles

Introduction

Ces travaux traitent de reconstruction automatique des toits, en milieu urbain, à partir d'images aériennes stéréoscopiques à grande échelle. Les données en entrée sont composées d'un couple stéréoscopique à forte résolution (typiquement 10 cm) et d'un modèle numérique d'élévation (MNE). Celui-ci est obtenu par mise en correspondance dense des pixels du couple. Les techniques utilisées [BAILLARD 97] sont dédiées au milieu urbain et respectent les discontinuités de la surface topographique. Le MNE obtenu est fiable, dense et relativement précis.

Il permet la séparation du sol et du sursol (i.e. bâtiments et végétation), et au sein du sursol, le calcul de *zones de focalisation,* composées de un ou quelques bâtiments d'altitudes voisines. Les travaux proposés traitent ces zones de sursol indépendamment les unes des autres. Ils utilisent une famille de modèles (formes de toits prédéfinies) avec laquelle une reconstruction de la zone est proposée.

Aspects techniques

L'un des problèmes majeurs survenant avec les zones de focalisation est que ces dernières peuvent englober plusieurs toits voisins. Il faut donc savoir reconnaître un toit particulier et le traiter en tant que tel. Par ailleurs, en stéréoscopie simple, les techniques de détection d'objets de moyen niveau nécessaires à des reconstructions (segments de droite, points…) souffrent de lacunes, typiquement de sous-détections.

L'objectif principal de l'étude est donc de pallier les inconvénients de la stéréoscopie simple, et de savoir reconnaître un modèle dans une zone donnée, même si la zone comporte plus d'objets qu'une seule instance de ce modèle. À ces fins, des objets de moyen niveau de trois types différents (portions de plans 3-D, segments 3-D, façades) sont détectés indépendamment.

La figure B.1.1 présente une zone de focalisation et les objets détectés. Ces objets forment alors un graphe dont les sommets représentent les objets et dont les arcs qualifient les objets, au regard de certaines propriétés géométriques ou topologiques. Par exemple, un arc entre deux sommets représentant des segments 3-D porte des valeurs floues qualifiant si les deux segments s'intersectent, sont perpendiculaires, parallèles, etc…

D'un autre côté, un modèle est aussi représenté par un graphe, qui représente de manière symbolique la forme d'un toit. Les sommets sont à nouveau des objets géométriques et les arcs représentent les propriétés géométriques ou topologiques requises par les objets en question. Un modèle est ensuite *reconnu* dans le graphe issu des données, par des techniques d'appariement, et plus précisément par le calcul d'un isomorphisme de sous-graphe avec tolérance d'erreur [MESSMER, BUNKE 98].

Cette technique permet d'identifier, parmi les objets 3-D, ceux qui expliquent le modèle. Après cette identification, le modèle est instancié pour produire une reconstruction. Pour la zone de la figure B.1.1, le résultat de l'appariement et de la reconstruction avec un modèle de toit à deux pans est présenté en figure B.1.2, page suivante. Afin de reconstruire une zone de focalisation, plusieurs modèles peuvent intervenir. À cet effet, différentes reconstructions utilisant différents modèles sont produites, puis combinées en minimisant une fonction qui traduit le fait que la combinaison explique le MNE, jugé fiable. Le résultat de cette étape est présenté en figure B.1.3 (page suivante), où deux instances d'un même modèle sont utilisées pour reconstruire la scène. La figure B.1.4, page suivante, présente une autre zone de focalisation et une reconstruction associée.

L'ensemble de ces travaux est décrit dans [FUCHS 01], accompagné d'une évaluation des travaux. Cette évaluation montre que la complémentarité des objets détectés permet de contrer sensiblement les sous-détections, et que dans le cas de bâtiments regroupés au sein d'une zone de focalisation, la technique permet effectivement des reconstructions par combinaison d'instances de modèles.

L'évaluation faite sur cent zones de focalisation montre aussi que le taux de reconstruction correct est de 60%, ce qui est insuffisant pour qualifier l'outil d'opérationnel. Enfin, la précision géométrique finale est médiocre, ce qui implique un recalage ou un travail en amont de l'appariement, concernant les objets de moyen niveau. Par ailleurs, le traitement de zones importantes ou d'agrégats complexes de bâtiments reste inaccessible dans ce contexte. Pour progresser dans ce domaine, l'exploitation de la méthode dans un contexte multiscopique est possible (voir les travaux proposés dans [TAILLANDIER, DERICHE 02] et leur continuation).

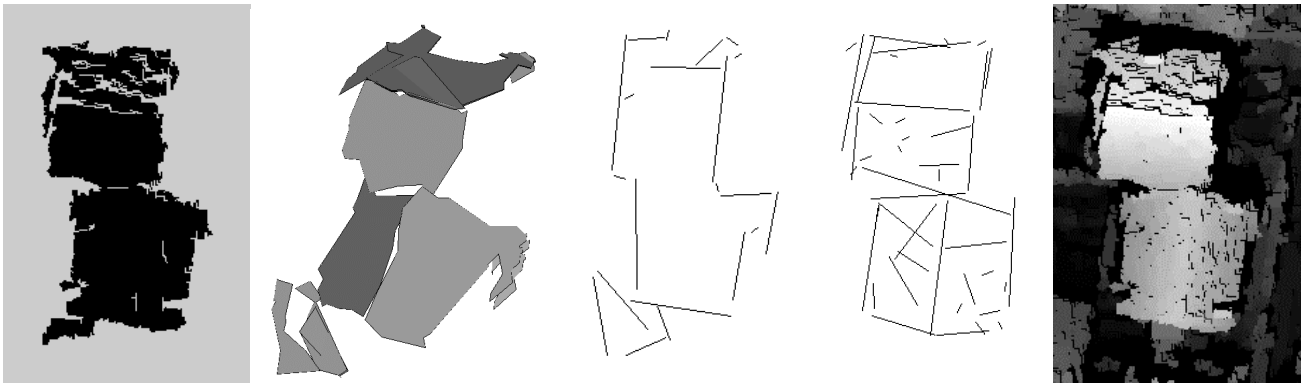


figure B.1.1

Le MNE de la zone de focalisation, le masque de la zone,
les plans détectés, les segments 3-D détectés et les discontinuités détectées.

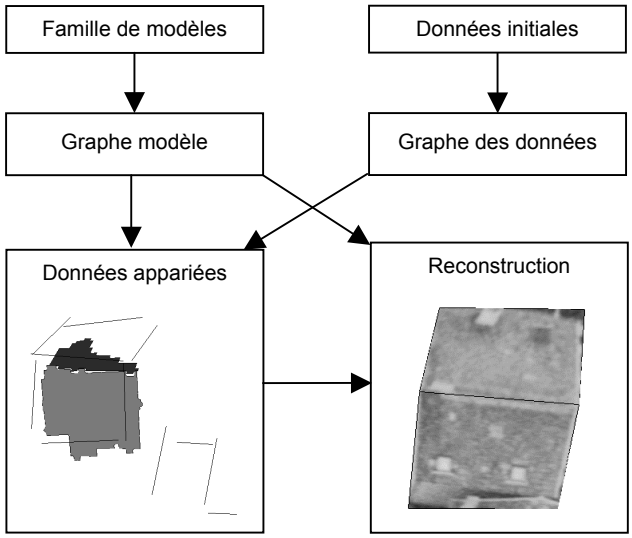


figure B.1.2 *: synthèse de l'approche*

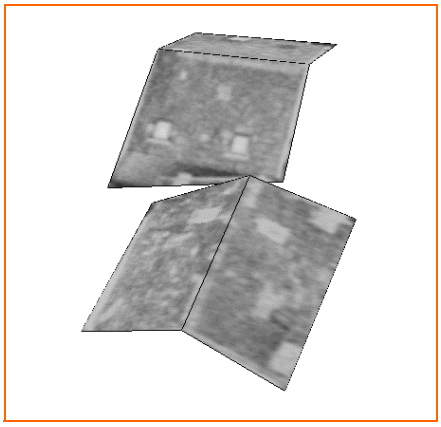


figure B.1.3

Résultat de la reconstruction complète de la zone.

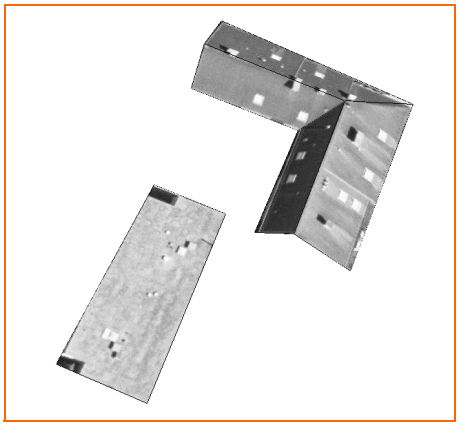


figure B.1.4

Couple stéréoscopique et reconstruction de deux toits de la zone.

Aspects opérationnels

La méthode peut s'insérer naturellement dans différents contextes. Il est envisageable d'exploiter d'autres sources d'information afin de constituer les zones de focalisation, comme les parcelles cadastrales. Il faut toutefois noter qu'en raison des différences de spécifications entre objet foncier (parcelle cadastrale) et objet topographique (toit), celles-ci posent des problèmes. Leur exploitation fait l'objet de travaux spécifiques [TAILLANDIER 02]. Des saisies manuelles sur ortho-images peuvent également être utilisées comme zone de focalisation. Le cas échéant, le problème de la vectorisation présent dans le cas du cadastre disparaît, et, de plus, l'information fournie peut être jugée très fiable et servir de prédicteur direct de la forme du toit. Le choix du modèle est automatique dans le système actuel, mais dans un contexte semi-automatique, il est possible de laisser ce choix à l'opérateur. Dans un contexte opérationnel, il est également nécessaire d'avertir l'opérateur en cas de problème. Un système d'alerte a été mis en place.

Extensions et conclusion

Le caractère fortement structurel de l'approche implique que le système ne peut reconnaître que des objets correspondant aux formes qu'il connaît. Concernant les autres formes de toits, il faut au minimum avertir l'opérateur (ce qui a été abordé), et, dans le meilleur des cas, proposer une reconstruction générique de la surface topographique. Les défauts relevés dans cette étude poussent également à proposer un recalage en aval des reconstructions, ainsi qu'une exploitation multiscopique de l'approche. Ici, en gain est attendu des détections d'objets de moyen niveau (meilleure précision et exhaustivité), ce qui devrait améliorer les performances de l'appariement lui-même (qui reste assez lourd actuellement) et permettre de traiter un espace plus vaste des formes de toits. Au chapitre des apports de la méthode, remarquons que la modélisation par graphes d'objets permet de gérer simultanément des objets de natures différentes en les plaçant sur un pied d'égalité. Ceci permet aux objets de se conforter mutuellement (et notamment, de lutter contre les sous-détections) en évitant partiellement les propagations d'erreurs entre types d'objets, puisque ceux-ci peuvent être détectés indépendamment les uns des autres.

Approche multi-vues

Dans le contexte de la modélisation de scènes urbaines à partir d'images numériques, la détermination de primitives 3-D fiables est une étape-clé pour structurer la scène. On décrit ici une solution pour l'extraction de primitives 3-D linéaires dans un contexte multi-vues et en milieu urbain. Contournant le problème combinatoire habituel, la mise en correspondance des segments 2-D se fait de façon symétrique dans l'Espace Objet discrétisé en voxels élémentaires et présente ainsi une complexité en O(n). L'algorithme énumère, dans un premier temps, toutes les mises en correspondance potentielles par balayage d'un plan dans l'Espace Objet puis élimine les faux appariements en utilisant un critère géométrique et un critère d'unicité.

Appariement dans l'Espace Objet

Les contours sont tout d'abord détectés, chaînés et polygonisés dans chaque image en utilisant des techniques usuelles. Chaque point de contour est ainsi labellisé en fonction du segment 2-D auquel il appartient. Le processus d'appariement est basé sur le concept d'appariement multi-images direct guidé depuis l'Espace Objet [COLLINS 95] comme illustré sur la figure B.1.5, page suivante.

Chaque voxel de la grille terrain 3-D est projeté dans les images de labels à la position (ik,jk) correspondante. On obtient ainsi un appariement possible si le nombre de labels mis en correspondance est supérieur à 3. En parcourant l'ensemble des voxels, on obtient alors l'ensemble des appariements potentiels. Chaque élément de cet ensemble est annoté avec le nombre de voxels dans lesquels l'association de labels a été détectée.

En fait, cette valuation est proportionnelle au recouvrement en 3-D dans le cas d'un appariement valide. En pratique, pour éviter de traiter séquentiellement tous les voxels, l'algorithme est basé sur une stratégie de balayage de plans : les images de labels sont projetées sur une grille terrain à une altitude z donnée. Par balayage de cette grille terrain le long de l'axe *z*, on peut dénombrer tous les appariements possibles. Cette stratégie de recherche d'appariement dans l'Espace Objet permet également de guider facilement la mise en correspondance au moyen d'un modèle numérique de surface pré-calculé.

Élagage des hypothèses

Critère géométrique

Pour élaguer l'ensemble des hypothèses obtenues à l'étape précédente, un critère géométrique est utilisé. Dans cette optique, une nouvelle méthode itérative de reconstruction de lignes 3-D à partir d'un nombre quelconque (> = 2) de lignes 2-D a été développée. Comparée à d'autres méthodes, celle-ci prend en compte l'incertitude sur les paramètres des lignes 2-D supportant les segments dans les images. Ceci permet d'obtenir une meilleure prise en compte de l'importance relative de chaque segment 2-D et permet d'obtenir des résidus normalisés.

Ce résultat normalisé est utilisé comme critère géométrique, utilisable quel que soit le nombre d'images, pour accepter ou rejeter les appariements potentiels. Un autre avantage de cette méthode est la mesure d'incertitude sur la localisation de la ligne 3-D fournie par l'algorithme et qui peut être utilisée dans des tests ultérieurs d'intersection de parallélisme ….

Critère d'unicité

L'ensemble des mises en correspondance, précédemment élagué grâce au critère géométrique, peut être trié en fonction du nombre de segments appariés et de la valuation. Un critère d'unicité (un segment dans une image ne peut appartenir qu'à un seul appariement) est ensuite utilisé pour garder l'association maximale tout en élaguant l'ensemble sur ce critère. Ce tri ainsi que la stratégie du « *winner takes all* » favorise les appariements de longs segments tout en évitant les appariements résiduels erronés.

Résultats

L'algorithme a été testé sur des données de simulation pour valider sa capacité à pallier les occlusions et le bruit. Nous montrons ici les résultats sur un jeu de données réelles de six images (figure B.1.6, page suivante). Il n'y a *de visu* aucun faux appariements. Le lecteur peut se référer à [TAILLANDIER, DERICHE 02] pour de plus amples détails sur l'algorithme et les résultats obtenus.

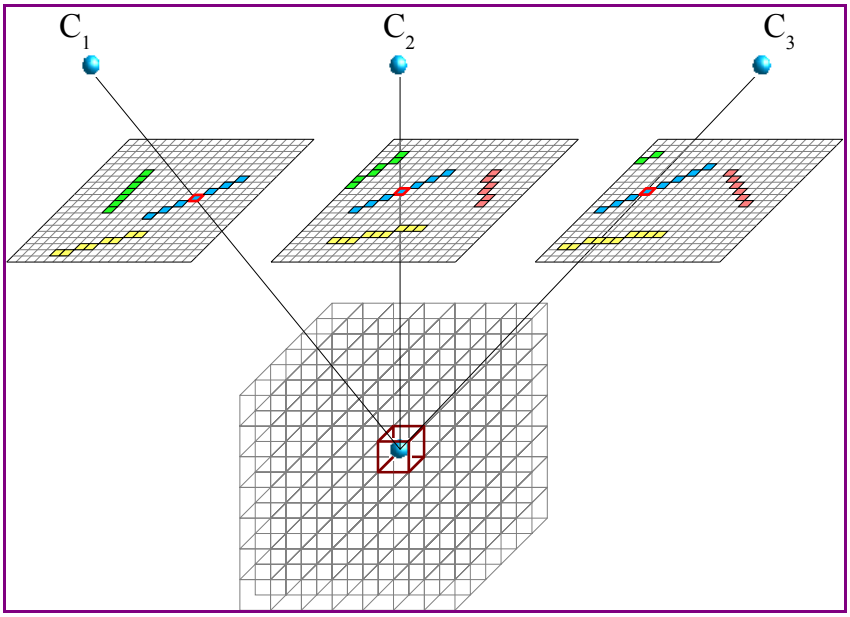


figure B.1.5

Appariement dans l'Espace Objet.
L'exemple montre comment une occurrence de l'appariement (blue,blue,blue) est générée.

figure B.1.6 *: trois des six images utilisées dans l'exemple*

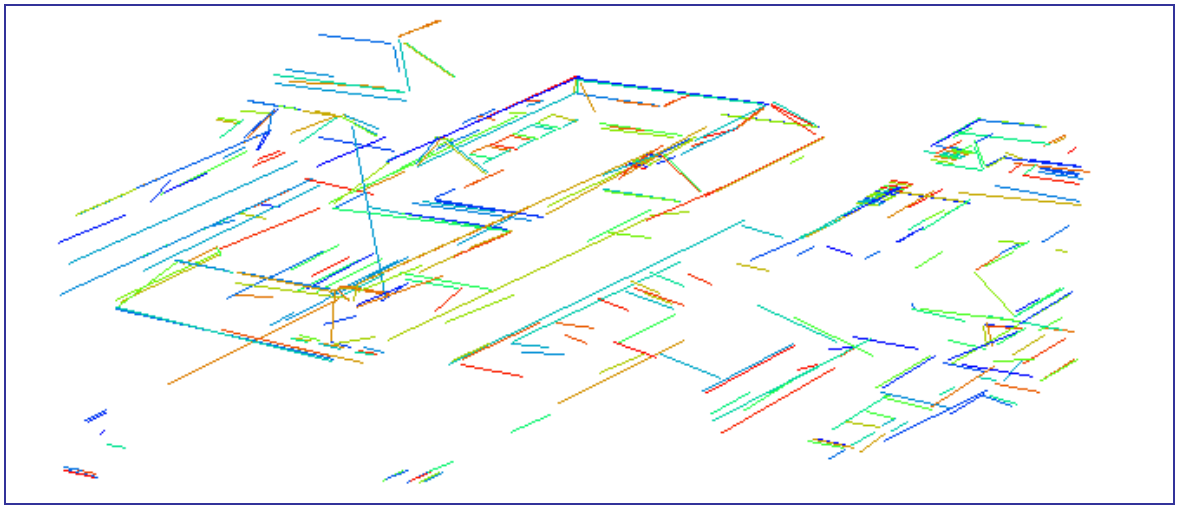


figure B.1.7 *: résultat de la reconstruction de primitives linéaires sur des données réelles*

Conclusion

L'algorithme développé ici montre des résultats prometteurs, en particulier dans sa capacité à pallier les erreurs de détection dans les images. Il favorise les correspondances qui ont le maximum de recouvrement et travaille en O(n), en ce qui concerne le schéma de mise en correspondance. À l'heure actuelle, cet algorithme est utilisé en conjonction avec un Modèle Numérique de Surface pour détecter et reconstruire des segments 3-D sur de vastes zones. La figure B.1.8, ci-dessous, illustre la pertinence de l'information apportée par les segments 3-D comme guide pour l'extraction de surface 3-D. Les modèles numériques utilisés pour générer trois points de vue obliques virtuels à partir d'images aériennes verticales ont été obtenus par densification (point 3-D) et triangulation de l'ensemble segments 3-D + points 3D.

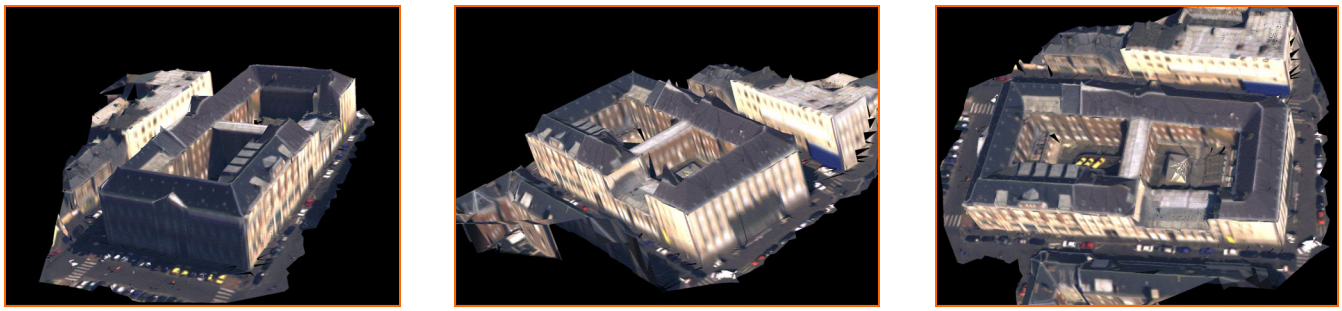


figure B.1.8

Trois points de vue virtuels créés avec le MNE obtenu par densification (point 3-D) et triangulation des segments 3-D.

Approche mise en 3-D de données planimétriques

Contexte et description générale

Cette approche se situe dans le contexte où l'on dispose, en plus des images, d'une base de données vecteur représentant l'emprise planimétrique des bâtiments. Sur le territoire français, cette information peut provenir par exemple de la BD Topo ou du plan cadastral. Dans nos essais, nous avons travaillé uniquement sur le plan cadastral qui présente l'avantage de correspondre à une segmentation plus fine en bâtiments individuels. Du point de vue des données images, nous nous sommes limités pour l'instant à de la stéréoscopie simple, mais l'approche est immédiatement extensible à de la multi stéréoscopie.

Dans le cadre de l'extraction automatique de modèles 3-D de bâtiments, l'information apportée par le plan cadastral est utile pour les raisons suivantes :

- *focalisation* : les modèle 3-D ne sont recherchés que sur les parties de l'image où il y a effectivement des bâtiments, on limite ainsi les calculs inutiles ;
- *directions* : le polygone limite du bâtiment cadastral est un indicateur, très fiable, des directions privilégiées de chaque bâtiment ;
- *segmentation* : enfin, la segmentation de la scène en bâtiments indépendants, fournie par le cadastre, correspond à son apport le plus important ; premièrement elle permet de décomposer le problème global d'extraction des bâtiments d'une scène en N « petits » sous-problèmes indépendants, ce qui permet de limiter la combinatoire et de passer relativement facilement d'un prototype de laboratoire à un programme capable de traiter de grandes scènes ; deuxièmement, moyennant l'hypothèse, très majoritairement vraie, qu'il n'y a pas de discontinuité à l'intérieur des bâtiments cadastraux, elle permet de contraindre les modèles de bâtiment recherchés et donc de rendre plus robustes les algorithmes ; troisièmement le découpage cadastral est une information cartographiquement pertinente, qu'il serait extrêmement difficile d'extraire des images (même pour un opérateur humain, l'information n'est pas évidente à rechercher).

La méthode développée procède de la manière suivante pour chaque bâtiment :

- on calcule, par une méthode traditionnelle, un MNE sur l'emprise pour obtenir une majoration du volume englobant du toit ;
- sur ce volume englobant, on calcule un « cube de corrélation » contenant pour chaque voxel V = (x,y,z) un coefficient de ressemblance mesuré sur les imagettes centrées sur les projections de V dans les images ;
- on qualifie les plans traversant le volume englobant par la moyenne des valeurs des voxels les composant sur le cube de corrélation et on sélectionne un sous-ensemble de plan maxima locaux de cette qualification ;
- finalement, on recherche la surface s'appuyant sur les plans détectés, compatible avec les modèles *a priori*, et maximisant un critère de qualité intégrant attache aux données et simplicité de description.

Nous allons maintenant détailler brièvement les deux dernières étapes de cette méthode.

Détection de plan

La première étape consiste à calculer un ensemble de plans candidats à être le support de la surface du toit. À partir des directions des contours de l'emprise planimétrique, on calcule un certain nombre de directions horizontales privilégiées. Pour chaque direction, on considère l'ensemble des plans 3-D obtenus par pivotement autour de cette direction et on calcule une transformée de Hough du cube de corrélation. La transformée de Hough génère un ensemble d'hypothèses, en général exhaustif. Ensuite différentes procédures de filtrage, notamment par comparaison avec un MNS de corrélation, sont utilisées pour supprimer des plans et limiter la combinatoire. La figure B.1.9 illustre la méthode développée pour la transformation de Hough et le filtrage.

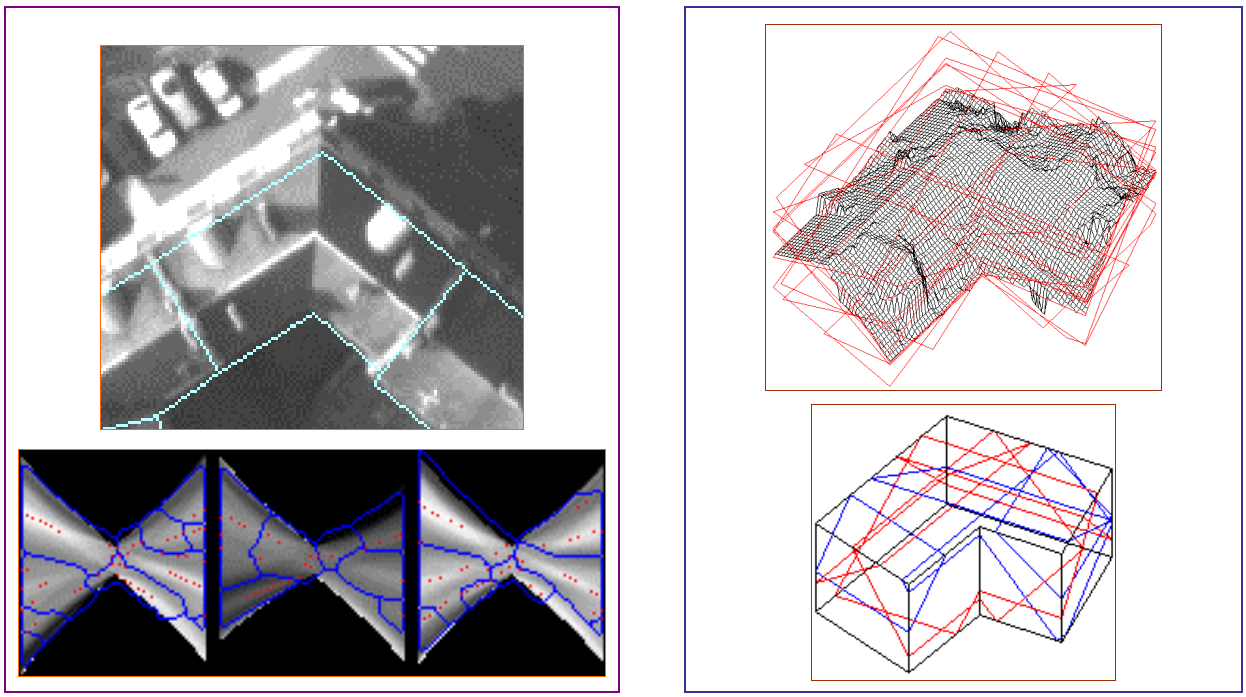


figure B.1.9

À gauche : un exemple de bâtiment simple et la transformée de Hough, dans trois directions privilégiées.
À droite : plan détecté par la transformée de Hough (en haut) et en bas : résultat du filtrage, les plans rouges sont les plans conservés.

Calcul de la surface de toit « optimale »

On aborde ensuite le problème comme un problème d'optimisation : recherche de la meilleure surface de toit admissible. On définit comme surface admissible une surface qui :

- est de la forme z = f (x,y) ;
- est continue ;
- s'appuie sur les plans détectés ;
- recouvre entièrement l'emprise planimétrique du bâtiment.

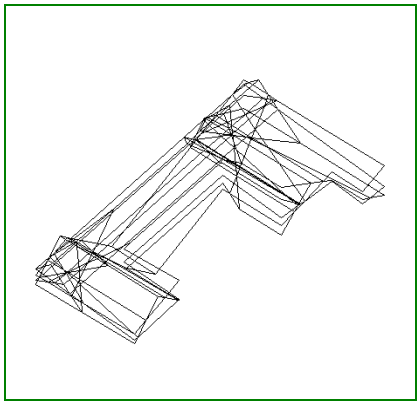
L'approche que nous avons retenue est basée sur de l'optimisation discrète : on calcule toutes les facettes 3-D définies par les plans et le volume englobant, en utilisant une méthode décrite dans [ELDESBRUNNER 87]. On montre alors que la recherche des surfaces admissibles revient au parcours des cliques maximales dans un graphe de compatibilité sur les facettes 3-D.

Pour chaque bâtiment, si la combinatoire du problème le permet, on explore alors toutes les cliques maximales et on retient celle qui maximise un score intégrant attache aux données et simplicité de la forme. Pour les fonctions de coût nous avons retenu les plus simples : le score d'attache aux données est un score de corrélation par des fenêtres horizontales, le score de simplicité est proportionnel au nombre de facettes. D'autres fonctions plus compliquées ont été essayées, mais on obtient des améliorations marginales pour des temps de calcul sensiblement plus importants.

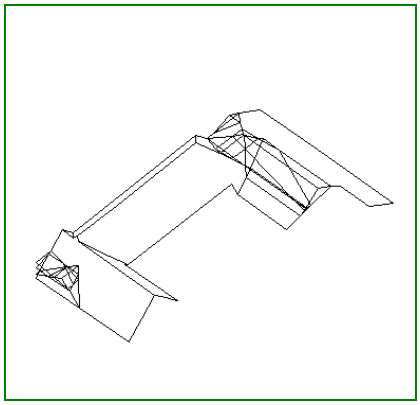
Lorsque la combinatoire est trop importante, différentes heuristiques sont appliquées pour supprimer suffisamment de facettes en amont du processus d'optimisation. La figure B.1.10 illustre ce procédé de pré-filtrage heuristique dans le cadre d'un bâtiment trop complexe pour aborder une recherche exhaustive des surfaces admissibles.

L'approche combinatoire permet naturellement de sélectionner les K meilleures solutions (au lieu de ne retenir que la meilleure). Ce qui permettra, dans le cadre d'un futur processus interactif, et pour les bâtiments les plus complexes, de laisser l'opérateur choisir entre plusieurs solutions possibles. La figure B.1.11 montre les trois meilleures solutions retenues de manière automatique. Sur ce bâtiment complexe, on voit que c'est la deuxième solution qui est la plus satisfaisante.

ici : un bâtiment complexe et son emprise cadastrale

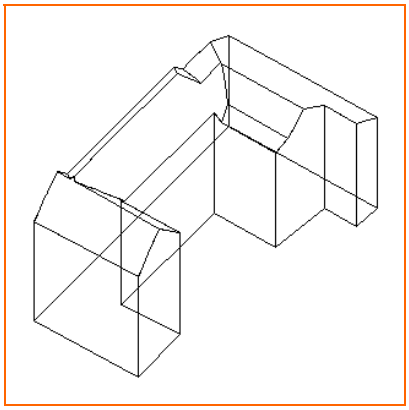


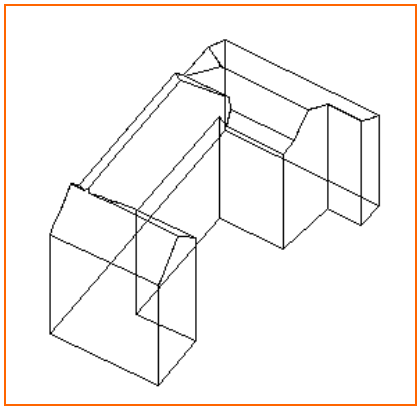
ici : l'ensemble des plans et des facettes



ici : les facettes après heuristique de pré-filtrage.

figure B.1.10





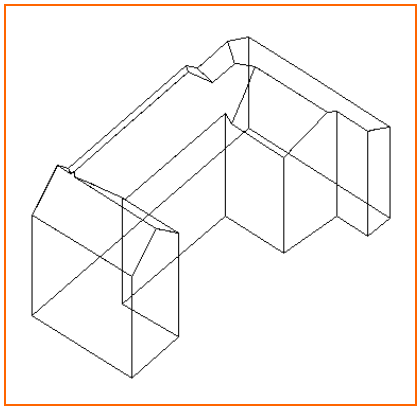


figure B.1.11

Les trois premières meilleures solutions retenues par l'algorithme à partir des données de la figure B.1.10 (classées de la gauche vers la droite).

Résultats et prolongements

Les évaluations quantitatives de cette approche sont en cours d'exécution. Une illustration des résultats obtenus est donnée sur la figure B.1.12, page suivante. De manière très qualitative, on peut indiquer les points forts et les points faibles de cette approche.

Les points forts sont les suivants :

- la forme globale des bâtiments est bien rendue lorsque les hypothèses de départ sur le cadastre (essentiellement, absence de discontinuité dans un bâtiment cadastral) sont vraies ;
- la méthode peut être utilisée sans adaptation pour traiter de grandes zones ;
- le découpage en bâtiment, fourni par le cadastre, est une information importante cartographiquement qui ne pourrait pas être retrouvée sur les images.

Les inconvénients sont les suivants :

- la précision géométrique ne semble pas très bonne, avec des erreurs au delà du pixel dans l'estimation des plans ;
- dès que le cadastre est faux la méthode de reconstruction échoue ;
- les bâtiments obtenus sont assez généralisés (ce qui peut aussi être vu comme un avantage dans certains contextes).

***figure B.1.12** : les résultats de l'approche par mise en 3-D du cadastre sur plusieurs îlots de bâtiments*

Conclusion

Cet article a présenté trois approches différentes, développées par le laboratoire MATIS, sur la construction automatique de modèles 3-D de bâtiments à partir de données stéréoscopiques. Indépendamment de l'aspect méthodologique, ces trois approches diffèrent par le type de données qu'elles utilisent en entrée.

Malgré les progrès réalisés, aucune des méthodes présentées ne semble aujourd'hui suffisante pour donner lieu à une industrialisation immédiate. Pour arriver à un processus de production, les points suivants devront être abordés :

- comment tirer partie du meilleur de chacune de ces méthodes, quitte à changer les données en entrée (faire du multi-stéréo avec des plans cadastraux, par exemple), pour arriver à des taux d'échec compatibles avec une production opérationnelle ;
- comment inter-agir avec un opérateur pour, d'une part, lui présenter les résultats d'une façon telle que les erreurs soient faciles à détecter et, d'autre part, quels systèmes de correction mettre en place pour corriger ces erreurs.

En dépit des progrès qui restent à réaliser, nous pensons que ces résultats sont suffisamment avancés pour pouvoir servir de base de discussion avec les utilisateurs potentiels des bases de données urbaines et orienter les recherches en fonction des erreurs réellement gênantes pour telle ou telle application.

Références

[BAILLARD 97] C. Baillard : *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques à grande échelle. Détection et caractérisation du sursol,* thèse de doctorat de l'ENST, directeur de thèse : Georges Stamon, spécialité : Signal et Images, laboratoire MATIS, IGN-SR 97-005/C-THE-CB, soutenue le 10 octobre 1997.

[BAILLARD et al 99] C. Baillard, C. Schmid, A. Zisserman and A. Fitzgibbon : *Automatic Line Matching and 3-D Reconstruction of Buildings from Multiple Views,* ISPRS'99, Munich (D), septembre 1999.

[COLLINS 95] R. Collins : *A space-sweep approach to true multi-image matching,* in Technical report, Computer Science Department, University of Massachusetts, December 1995.

[EDELBRUNNER 87] H. Edelsbrunner : *Algorithms in Combinatorial Geometry,* in EATCS Monographs on theoretical Computer Science, vol. 10. Springer-Verlag, 1987.

[FÖRSTNER, GÜLCHE 87] W. Förstner and E. Gülche : *A fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct points, Corners and Circular Features,* in Proceeding of the inter-commission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, pp. 281-305, 1987.

[HENRICSON 98] Olof Henricson : *Analysis of Images Structure using Color Attribute ans Similarity Relations,* thèse de doctorat de l'Université de Zurich, 1996.

[NEVATIA, HUERTAS 98] R. Nevatia & A. Huertas : *Knowledge-Based Building Detection and Description,* 1997-1998.

Publications

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

[PAPARODITIS et al 00] N. Paparoditis, C. Thom and H. Jibrini : *Surface reconstruction in urban areas from multiple views of aerial digital frames,* in IAPRS, volume XXXIII, Amsterdam (NL), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-005/C-COM-NP, 2000.

Année 2002

[TAILLANDIER, DERICHE 02] F. Taillandier & R. Deriche : *Reconstruction de primitives linéaires 3-D en multi-vues pour la modélisation de scènes urbaines*, à paraître dans les Actes RFIA'2002, Angers (F), laboratoire MATIS, IGN-SR 02-002/C-COM-FT, 2002.

B.2 Détection de changements par comparaison de couples stéréoscopiques

Franck Jung

Résumé

Le but de cette application est de détecter les changements d'une scène rurale à l'aide de couples d'images aériennes stéréoscopiques prises à plusieurs années d'intervalle. L'objectif de cette application est la mise à jour de bases de données. Le processus mis en place fournit, en sortie, un ensemble de zones ayant une forte probabilité de comporter des changements. Chacune de ces zones sera soumise à un opérateur humain. Celui-ci aura le choix de valider le changement proposé et de l'intégrer dans la base de données, ou bien de le rejeter. L'algorithme à concevoir devra extraire un nombre restreint de zones à analyser afin de diminuer le coût en temps d'investigation nécessaire à l'opérateur pour détecter les changements.

Les changements étudiés dans cet article concernent la classe bâti. Afin d'isoler les nouveaux bâtiments, l'algorithme mis en place procédera en deux étapes. La première, appelée *étape de focalisation* devra éliminer une grande partie de la scène sans perdre les véritables changements. Cette étape est réalisée à l'aide d'une comparaison de Modèles Numériques d'Elévation (MNE), calculés aux deux dates. Les MNE représentent une information d'élévation pour la scène considérée. Le calcul de MNE est effectué par un algorithme de mise en correspondance stéréoscopique. Cette étape nous fournit des zones de focalisation pouvant être décrites par quatre images : un couple stéréoscopique acquis à l'ancienne date et un couple stéréoscopique acquis à la nouvelle.

La seconde étape consiste à décider si la zone de focalisation calculée contient un changement ou non. Cette décision est prise en classant chaque image dans la classe bâti ou non-bâti. Cette classification est réalisée à l'aide d'un vote d'un nombre important d'arbres de décision construits par apprentissage. Compte tenu de la résolution relativement faible des images traitées (taille du pixel : 50 cm) et de leur bruit important (photographies panchromatiques scannées), le processus de décision ne recherchera pas un modèle très détaillé de bâtiment avant de prendre la décision. Ainsi, chaque nœud d'un arbre de décision cherchera la présence d'un graphe de primitives (contours) ayant une probabilité plus élevée d'être présent au sein de la classe bâti qu'au sein de la classe non-bâti. La décision finale est prise en comparant les résultats de la classification aux deux dates.

Contexte et objectifs

Le problème de la détection de changements dans les images aériennes a déjà été abordé suivant plusieurs approches. Elles ont été motivées par diverses applications ainsi que par les différentes données disponibles en entrée (bases de données, images...). Dans cet article, nous donnerons un état de l'art sommaire de la problématique de détection de changements. Puis, après avoir fixé les données utilisées en entrée de notre système et défini l'application visée, nous donnerons notre définition d'un changement. Finalement, les détails de notre approche seront exposés.

Comme dans [JENSEN 97], nous considérons principalement deux approches du problème de la détection de changements. La première approche recherche les changements pour une classe d'objets fixée. Dans ce cas, la stratégie se décompose souvent en deux étapes : un algorithme de comparaison est utilisé afin de délimiter des zones de focalisation qui seront ensuite examinées par un algorithme de classification. Cette approche peut être utilisée à partir du moment où l'on dispose d'une mesure invariante pour la famille d'objets dont on recherche les changements.

Cette approche est utilisée dans [JAMET 98]. Dans ces travaux, un modèle numérique d'élévation calculé à partir des images récentes est comparé à un MNE généré à l'aide de l'ancienne base de données. Cette comparaison permet ainsi d'exhiber les nouvelles constructions. La seconde approche considère l'ensemble des changements d'une scène simultanément. Cette approche est très ambitieuse car elle nécessite un algorithme de classification très performant pour l'ensemble des objets présents dans la scène. Une telle approche a notamment été utilisée pour la mise à jour de l'occupation du sol à partir d'images SPOT [HUET 96]. Cette stratégie a également été appliquée en imagerie aérienne avec un environnement très contrôlé (modèle 3-D de la scène). Ce modèle 3-D a été généré manuellement a une date donnée et est comparé aux nouvelles images. Dans [BEJANIN 94], [CHELLAPPA 94] et [HOOGS 94], une comparaison/mise en correspondance de primitives issues de modèles avec des primitives issues des images est réalisée.

Parmi les travaux n'entrant pas dans les deux catégories précédentes [JENSEN 97], citons les travaux de [SARKAR 98]. Sarkar & Boyer ont abordé le problème de la détection de changements dans un contexte de comparaison image/image. Leur approche consistait à détecter des différences de groupement ou d'organisation de primitives aux deux dates. Cette approche ne dépendait donc pas d'une classe d'objets particulière. Nous pouvons néanmoins affirmer que la stratégie choisie est dépendante de l'application visée, des données ainsi que des algorithmes de classification disponibles. Dans nos applications, nous utiliserons un couple stéréo à la date t1 et un couple stéréo à la date t2 ($t2 - t1 \approx 5$ à 10 ans). Nous supposerons connus les paramètres de calibration interne et externe des caméras. La taille du pixel-sol est de l'ordre de 50 cm et nous recherchons, comme dans [JAMET 97], les changements de la classe bâti.

Notre étude veillera à garder le nombre de sous-détections très faible. Comme dans [SARKAR 98], notre approche est complètement basée sur une comparaison image/image. Nous n'utiliserons pas de données externes telles qu'un modèle 3-D de la scène, une carte d'albédos ou un modèle d'illumination. Nous pouvons à présent définir les changements recherchés

dans notre application. « Nous appelons changement toute structure de bâtiment construite ou détruite dans une zone donnée. Les structures recherchées doivent être de taille significative. Les changements recherchés devront nécessairement avoir une superficie supérieure à 25 m² ou, de façon équivalente, compte tenu de notre résolution de travail, cent pixels (la taille du pixel sol est d'environ 45 cm dans nos applications) ». Nous cherchons donc un algorithme capable de mesurer la cohérence de deux couples stéréo sur une classe d'objets fixée : les bâtiments. Nous voulons, plus particulièrement, garder un contrôle sur le taux d'erreur à chaque étape de notre processus. Dans notre cas, nous étudierons la cohérence des objets de la classe bâti aux deux dates. Compte tenu de la relativement faible résolution de nos images et du rapport signal sur bruit médiocre, nous ne viserons pas une reconstruction 3-D complète des bâtiments présents dans notre scène. Cette tâche s'avère ambitieuse même pour un opérateur humain (figure B.2.1).

figure B.2.1

Exemple de bâtiments possédant plusieurs ambiguïtés locales. Compte tenu de la relative faible résolution et du rapport signal sur bruit médiocre, nous ne rechercherons pas de modèles 3-D très détaillés des bâtiments lors de notre étape de détection de changements.

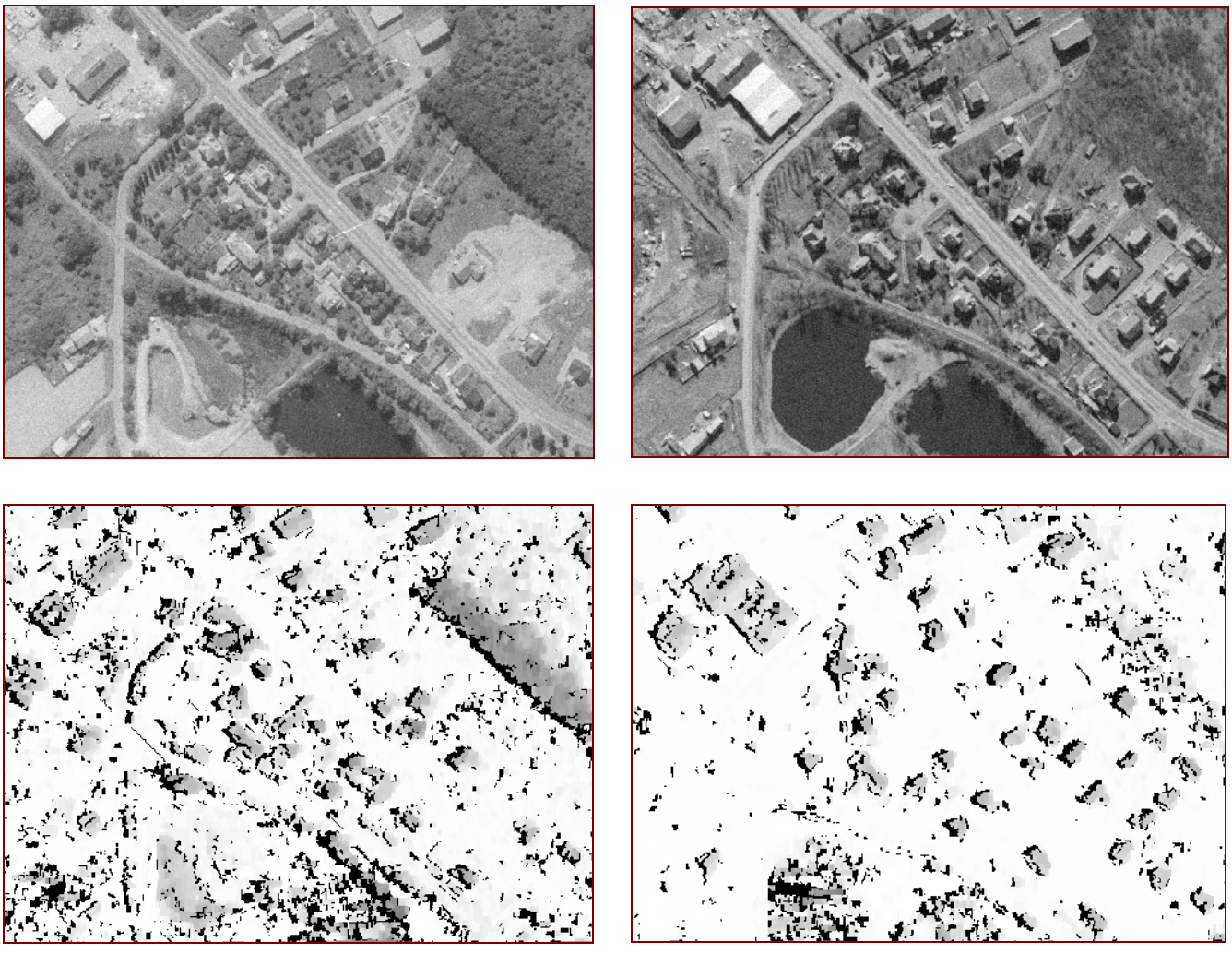


figure B.2.2 *: exemple de prises de vues d'une même scène à plusieurs années d'intervalle. Il est possible de constater des changements pour plusieurs classes d'objets (végétation, bâtiments, plans d'eau, etc). Chaque colonne représente une image à une date donnée associée à un modèle numérique d'élévation. Une zone noire représente une zone sur laquelle nous ne disposons pas d'informations. Pour le reste de l'image, plus une zone sera claire, plus sa hauteur sera faible.*

Notre approche peut avoir plusieurs applications possibles. La stratégie développée pourra servir d'outil lors d'une mise à jour semi-automatique d'une base de données. En effet, l'application sélectionne, dans une scène donnée, un ensemble réduit de régions contenant tous les changements. Ces régions pourront ensuite être soumises à un opérateur qui pourra ainsi sélectionner les objets à ajouter ou à modifier dans la base de données.

Afin d'être le plus exhaustif possible nous devrons mettre en place une stratégie permettant de détecter tous les changements pertinents même si le nombre de sur-détections reste élevé. Dans les sections suivantes, nous décrirons notre algorithme de focalisation basé sur une comparaison d'élévation inter-dates. Chaque zone de focalisation sera ensuite indexée à l'aide de notre algorithme de classification. Nous montrerons ensuite quelques résultats sur différentes scènes. Nous conclurons enfin et donnerons des pistes de recherches futures.

L'algorithme de focalisation

Le but de cette étape est d'éliminer de grandes parties de la scène à traiter sans oublier aucun véritable changement. Dans ce cadre, il est très difficile d'utiliser des informations radiométriques. En effet, toutes les structures (toits, routes, végétation, etc) sont sujettes à de nombreux changements radiométriques ne présentant aucun intérêt dans le cadre de la mise à jour de bases de données (figure B.2.3). Mentionnons également les problèmes liés aux ombres des objets 3-D qui peuvent être modifiées entre l'ancienne prise de vues et la nouvelle.

Une première manière d'appréhender le problème aurait consisté à calculer des cartes de profondeur intra-dates. Néanmoins, la corrélation entre images diachroniques est très difficile, compte tenu des nombreux changements radiométriques non pertinents dans notre contexte. Il nous aurait fallu construire un corrélateur dédié à cette tâche (permettant de gérer les inversions de contraste, etc).

Nous avons donc décidé de nous limiter à une simple comparaison d'élévation entre les deux dates. En effet, la profondeur (si elle est disponible) semble être le seul véritable invariant utilisable pour déterminer la présence d'un changement 3-D (figure B.2.2). Nous n'avons pas voulu développer un nouvel algorithme permettant de générer des MNE, nous avons préféré évaluer différents algorithmes existants et sélectionner celui qui semblait être le plus approprié pour notre application.

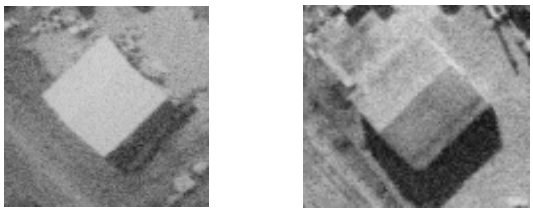


figure B.2.3

Exemple de changements radiométriques pour un même bâtiment.
L'image de gauche a été acquise cinq années avant l'image de droite

Nous avons donc étudié différents algorithmes de construction de Modèles Numériques d'Élévation [BAILLARD 97], [JAMET 98], [PAPARODITIS 98]. Ils permettent de générer des MNE robustes. Nous avons finalement sélectionné l'algorithme décrit dans [BAILLARD 97] et qui est basé sur une recherche de chemin de coût minimal le long d'une épipolaire. Le coût minimisé intègre des pénalités de discontinuité ainsi que des similarités radiométriques. Même si cet algorithme ne permet pas de reconstruire précisément les objets de la scène, nous observons tout de même des variations d'élévation significatives pour chaque bâtiment de la scène (figures B.2.2 et B.2.4).

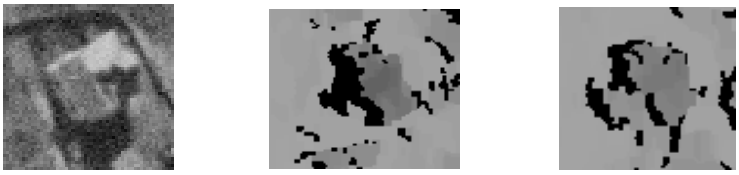


figure B.2.4

MNE calculés. Une zone noire représente une zone sur laquelle
nous ne disposons pas d'informations. Pour le reste de l'image, plus une zone sera claire plus sa hauteur sera faible.

Notre algorithme de focalisation est basé sur la comparaison d'élévations. Afin de comparer les différentes élévations, nous nous plaçons dans un référentiel cartographique commun. Les élévations sont comparées dans des petites zones carrées (typiquement de taille 4,5 m x 4,5 m).

Nous recherchons des bâtiments de hauteur significative $S_k = 4\ m$ au-dessus du sol. Cette hauteur est un paramètre qui est resté fixe pour l'ensemble de nos applications.

Nous avons retenu les régions susceptibles de contenir un changement suivant le critère suivant :

$$med\ (H_0) + S_h\ \ med\ (H_n)$$

H_0 (resp. H_1) représente la médiane de l'histogramme des élévations à l'ancienne date (resp. à la nouvelle date) dans une fenêtre de taille 10 x 10. Ainsi, notre critère est vérifié simplement si la médiane de l'histogramme de l'élévation à la nouvelle date est plus élevé de $S_h = 4\ m$ par rapport à l'histogramme de l'élévation à l'ancienne date.

La détection des bâtiments détruits pourra être réalisée en inversant formellement les dates d'acquisition des images. Compte tenu du nombre extrêmement faible de bâtiments détruits dans nos scènes traitées, nous n'avons pas réalisé ces expériences. Nous prenons ensuite les composantes connexes des régions de focalisations, nous obtenons ainsi des zones d'intérêt qui seront ensuite classées en zones contenant des changements et en zones sans changements (figure B.2.5).

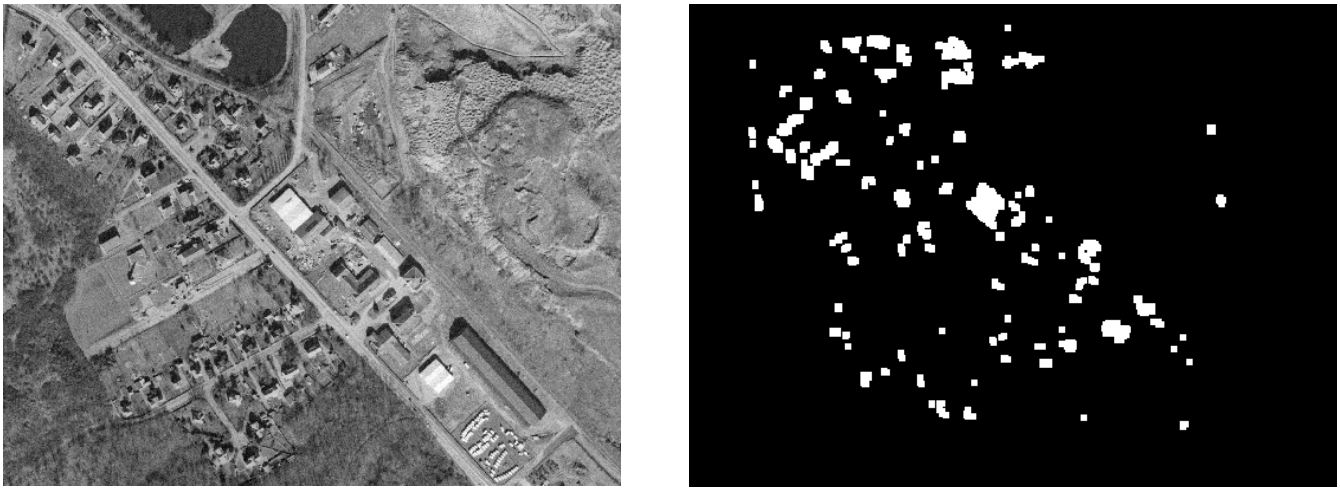


figure B.2.5

Résultats d'une comparaison de MNE. Chaque région de couleur blanche constitue une zone de focalisation.

À l'issue de cette étape, nous obtenons un ensemble de régions comportant 2/3 de sur-détections et 1/3 de changements pertinents. La plupart des sur-détections proviennent d'erreurs de localisation de l'algorithme de corrélation utilisé (le même bâtiment est présent aux deux dates) ou à la végétation (la végétation peut générer des profondeurs aléatoires).

Nous sommes, à présent, confrontés à un problème de classification classique. La figure B.2.6 montre un exemple de régions suite à l'étape de focalisation. La première colonne contient des sur-détections et la dernière colonne contient de véritables changements. Chaque zone de focalisation comporte un quadruplet d'images. Chaque image du quadruplet correspond à une re-projection de la zone de focalisation calculée dans le référentiel cartographique dans une de nos images initiales.

L'étape de focalisation nécessite principalement deux paramètres. Le premier paramètre représente une élévation minimale du bâtiment. Ce paramètre peut être déterminé en fonction des contraintes de l'application visée. Le second paramètre représente la taille de la fenêtre glissante utilisée pour la comparaison d'élévation.

Cette taille dépend également de l'application visée. Ainsi les deux paramètres de cette étape ont une interprétation physique claire et s'expriment en mètres. Dans nos expérimentations nous avons travaillé sur des zones de 2 km x 2 km. Nous avons noté quatre cents changements, environ. Le taux de sous-détection, pour cette étape était de l'ordre de 2%. Il sera toutefois nécessaire de réaliser des estimations complémentaires sur d'autres paysages afin de corroborer ces statistiques.

Chaque quadruplet correspond à une zone unique de focalisation. Pour chaque quadruplet, les deux images de gauche représentent l'ancien couple stéréo centré sur la région d'intérêt. Les deux images de droite représentent le couple stéréo à la nouvelle date. Les régions de focalisation de la colonne de gauche représentent des sur-détections. Les régions de focalisation de la colonne de droite représentent des vrais changements pertinents pour notre classe d'intérêt : les bâtiments.

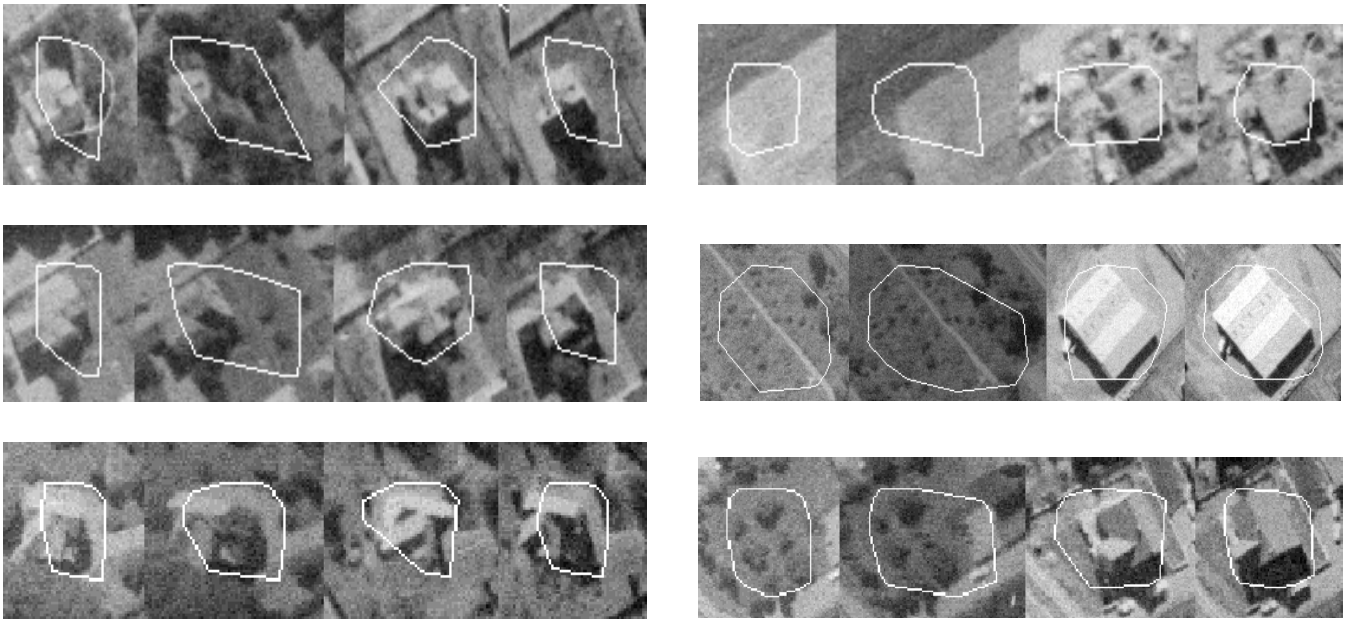


***figure B.2.6** : zones de focalisation*

L'algorithme de classification

À présent, nous allons classer chaque région de focalisation en deux classes : changement et non changement. Dans la première partie, nous allons décrire notre algorithme de détection de changement. Cet algorithme utilise une classification Bâti/ Non Bâti, qui sera décrit dans la seconde partie.

L'algorithme de détection de changement

Afin de soumettre un nombre restreint de zones de focalisation à un opérateur humain, nous utilisons un détecteur de bâtiment $\hat{Y}$.

Ce détecteur classera chacune des quatre images de la zone de focalisation dans la classe Bâti ($\hat{Y} = 1$) ou la classe non-bâti ($\hat{Y} = 0$). En effet, chaque zone de focalisation est décrite par le quadruplet (ω_1, ω_2, ω_3, ω_4). La paire (ω_1, ω_2) (resp. (ω_3, ω_4)) représente l'ancien (resp. le nouveau) couple stéréo centré sur la zone.

Une zone de focalisation sera classée comme zone de changement dès que les deux conditions suivantes seront vérifiées :

$$min\left(\hat{Y}(\omega_1), \hat{Y}(\omega_2)\right) = 0$$
$$max\left(\hat{Y}(\omega_3), \hat{Y}(\omega_4)\right) = 1.$$

Ainsi, une zone de focalisation sera soumise à un opérateur humain dès qu'une des anciennes images sera classée en non-bâti et une des nouvelles images sera classée en bâti. Nous allons, à présent, décrire l'algorithme de classification $\hat{Y}$.

Construction du détecteur $\hat{Y}$

Rappelons que l'étape de classification se justifie par le fait que nous sommes confrontés à un grand nombre de changements sans aucun intérêt pour notre problème (différentes ombres, radiométrie des toitures, etc). Enfin, compte tenu de la relativement faible résolution de nos images et du niveau de bruit élevé, il semble illusoire de tenter une reconstruction complète des bâtiments se trouvant dans nos régions de focalisation. Notons que, compte tenu de la résolution des images, il est même difficile d'entreprendre d'autres stratégies de mise en correspondance de primitives que les algorithmes de corrélation utilisés. Ainsi, nous allons procéder à une classification monoscopique de chacune des images de la zone d'intérêt.

L'ensemble de ces remarques nous conduisent à construire un algorithme $\hat{Y}$ qui combine plusieurs primitives locales dans une image afin de décider si cette image contient un bâtiment. Plus précisément, nous construisons un grand ensemble de graphes représentant des relations entre contours élémentaires dont la présence est plus probable dans des imagettes de bâtiments que pour les autres imagettes. La construction « manuelle » de ces graphes représente une tâche coûteuse ne donnant pas nécessairement d'indications sur la pertinence des choix réalisés. C'est pour cela que nous avons choisi de construire un algorithme basé sur un ensemble d'apprentissage. Nous essayons de trouver les graphes de contours en estimant les probabilités de présence sur un ensemble d'apprentissage.

La façon de construire ces graphes est basée sur les idées présentées dans l'article d'Amit and Geman [AMIT 97]. La première étape de notre algorithme consiste à réaliser un recodage de chaque image en une image de contours labellisée. Chaque label représente une direction de contours. Les contours sont calculés en utilisant un filtre invariant aux variations croissantes de niveaux de gris [JUNG 01]. La figure B.2.7 donne un exemple de bâtiment avec le recodage associé. Nous allons, à présent, rechercher des graphes de contours. L'algorithme de construction des graphes est identique à celui de [AMIT 97].

Nous construisons un arbre de décision à l'aide d'un ensemble d'apprentissage. À chaque nœud *s* de l'arbre est associé un graphe de relations spatiales entre contours. Des graphes relativement complexes sont construits par extension de graphes élémentaires [JUNG 01], voir figure B.2.8, en bas de page. Afin d'obtenir un ensemble très grand de graphes, nous construisons plusieurs arbres $\{T_1,\ldots,T_N\}$, chaque arbre essayant d'étendre des relations élémentaires différentes.

Pour une image ω à classer, chaque arbre T_i va voter pour une classe (Bâti ou Non-Bâti) en fonction de la feuille atteinte par l'image (figure B.2.8). La figure B.2.7 nous montre quelques exemples de questions (graphes de contours). Notons simplement que les graphes qui ont été appris sur notre ensemble d'apprentissage correspondent très souvent à des relations de parallélisme ou d'orthogonalité entre contours. Nous avons justifié dans [JUNG 01] pourquoi cette méthode de construction d'arbres nous permet d'éviter, dans une large mesure, les problèmes de sur-apprentissage. Dans nos applications, nous avons construit cent arbres avec un ensemble d'apprentissage de quatre cents bâtiments.

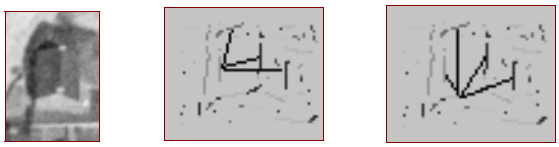


figure B.2.7

Exemples de graphes retenus par notre algorithme d'apprentissage. Le graphe de relations entre contours est en noir.

À chaque nœud de l'arbre est associé un graphe. Ce graphe a été sélectionné à l'aide d'un ensemble d'apprentissage. À chaque feuille de l'arbre sera associée une distribution empirique de nos deux classe (Bâti et Non-Bâti). À une imagette arrivant à un nœud s sera associé l'indice de la classe majoritaire de cette distribution. Pour un nœud interne de l'arbre, une imagette sera « envoyée » vers la droite lorsque le graphe de contours associé à *s* se trouve dans l'imagette. Ainsi, chaque arbre vote pour la classe bâti ou non-bâti. Nous additionnons l'ensemble des votes de tous les arbres. Finalement, nous associerons à l'imagette la classe recueillant la majorité des votes.

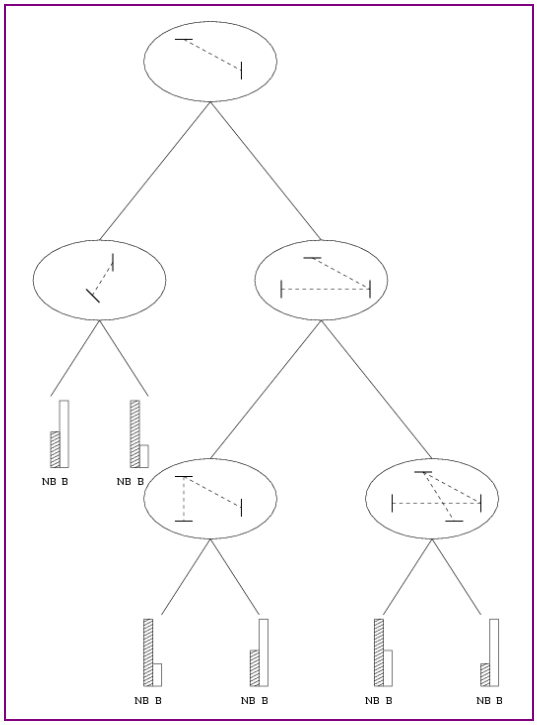


figure B.2.8 *: exemple d'arbre de décision*

Résultats

Suite à l'étape de classification (changement *vs* non changement), le taux de sous-détections se situe aux alentours de 10% et le nombre de sur-détections se situe aux alentours de 10 à 15%. L'utilisation de notre algorithme sur une scène est illustrée par la figure B.2.9, ci-dessous et la figure B.2.10, page suivante. Notre approche a été testée sur différentes scènes. Nous avons noté environ quatre cents changements. Afin de corroborer les taux d'erreur évoqués, il faudra réaliser des tests complémentaires sur différentes scènes. Des travaux de détection de changement à des résolutions plus fines devront également être abordés. L'algorithme décrit semble être bien adapté aux résolutions entre 40 cm et 1 m.

Temps d'exécution

L'ensemble de nos expérimentations a été réalisé sur un Pentium 500 MHz. La classification d'une image prend environ dix secondes pour cent arbres. L'algorithme de comparaison des élévations est rapide et prend environ vingt secondes pour une scène de 500 m x 500 m.

Conclusion et travaux futurs

Nous avons décrit notre algorithme de détection de nouveaux bâtiments à partir d'une comparaison d'images aériennes. La principale contrainte a été de garder le taux de sous-détection aussi faible que possible. Les taux d'erreur mis en évidence semblent encourageants.

Plusieurs améliorations peuvent être étudiées :

- un grand nombre des erreurs constatées est dû à des artéfacts des algorithmes de corrélation. L'utilisation de données laser semble être une piste intéressante permettant de pallier à ce problème ;
- l'utilisation d'une segmentation permettant d'isoler la végétation permettrait également de limiter le nombre de sur-détections. En effet, les zones contenant de la végétation sont difficiles, étant donné que les MNE ne sont que très peu fiables dans ces zones et que l'algorithme de classification prend en compte un grand nombre de contours aléatoires difficiles à éliminer par mise en correspondance de graphes ;
- la comparaison d'un temps opérateur de mise à jour-complètement manuel et le temps opérateur par notre système devra être effectuée. Une étude des informations à fournir à un opérateur humain par notre système reste encore à réaliser (une zone de focalisation par changement, une zone de focalisation pour plusieurs changements voisins, etc) ;
- l'amélioration du taux d'erreur pour des bases de données plus précises passera nécessairement par une modification de l'étape de classification. Il ne sera plus possible de se contenter que d'une classification bâti/non bâti, il faudra prendre en compte et comparer les différentes structures composant l'objet 3-D (pans de toits, lignes faîtières, etc.).

figure B.2.9

Résultat d'une détection de changements.
L'image de gauche (resp. de droite) montre la scène à la date t1 (resp. t2) avec t2 > t1.

figure B.2.10

Résultat d'une détection de changements.
Ici, le nombre de sur-détections resté élevé compte tenu de la présence de la végétation.

Références

[AMIT 97] Y. Amit and D. Geman : *Shape quantization and recognition with randomized trees,* in Neural Computation, 1997, vol. 9, pp. 1545-1548, 1997.

[BEJANIN 94] M. Bejanin, A. Huertas, G. Medioni and R. Nevatia : *Model Validation for Change Detection*, in Proceedings ARPA Image Understanding Workshop (Monterey , CA), Morgan Kaufmann, pp. 287-294, november 1994.

[CHEPPALLA 94] R. Chellappa, Q. Zheng, L.S. Davis, C.L. Lin, X. Zhang, C. Rodriguez, A. Rosenfeld and T. Moore : *Site-Model-Based Monitoring of Aerial Images,* in Proceedings ARPA Image Understanding Workshop, Monterey, CA (USA), Morgan Kaufmann , november 1994.

[HOOGS 94] A. Hoogs and R. Bajcsy : *Segmentation Characterization for change detection,* in Proceedings ARPA Image Understanding Workshop (Monterey , CA), Morgan Kaufmann, pp. 1555-1562, november 1994.

[JENSEN 97] J. Jensen : *Principles of change detection using digital remote sensor data,* Star, Estes, McGwire (Eds), Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing, Cambridge Univ Press, 1997.

[SARKAR 98] S. Sarkar and K.L. Boyer : *Quantitative Measures of Change Based on Feature Organization : Eigenvalues and Eigenvectors*, in Computer Vision and Image Understanding, vol. 71, n° 1, 1998.

Publications

[BAILLARD 97] C. Baillard : *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains*, thèse de doctorat de ENST, directeur de thèse : G. Stamon, spécialité : Signal et Images, laboratoire MATIS, IGN-SR-97-005/C-THE-CB, soutenue le 10 octobre 1997.

[JUNG 01] F. Jung : *Reconnaissance d'objets par focalisation et détection de changements,* thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique, directeur de thèse : Donald Geman, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-007/C-THE-FJ, soutenue le 2 novembre 2001.

[HUET 96] C. Huet, M. Tonon, H. Le Men and O. Jamet : *Towards an automatic updating process for land-cover cartography using SPOT images interpretation,* The European Symposium on Satellite and Remote Sensing III, Taormina (I), laboratoire MATIS, IGN-SR-96-038/C-COM-CH, 1996.

[JAMET 98] O. Jamet : *Comparaison Vecteurs-Images pour la détection des changements des bâtiments d'une base de données topographiques,* thèse de doctorat de l'ENST, directeur de thèse : Henri Maître, laboratoire MATIS, IGN-SR-98-005/C-THE-OJ, soutenue le 11 décembre 1998.

[PAPARODITIS 98] N. Paparoditis, M. Cord, M. Jordan and J-P Cocquerez : *Building Detection and Reconstruction from Mid- and High-Resolution Aerial Imagery,* in Computer Vision and Image Understanding, vol. 72, n° 2, laboratoire MATIS.

B.3 Aérotriangulation analytique, GPS absolu et autres problèmes

Philippe Hottier

Le GPS peut donner les coordonnées d'une antenne embarquée sur un avion à probablement 0,10 m près (en mode GPS absolu). Donc, en principe, en mode GPS absolu, aucun appui-terrain ne serait nécessaire pour un bloc de bandes de prises de vue aérienne (pour une seule bande, ce serait évidemment incorrect). D'où il serait possible de faire de substantielles économies : avec l'équipement courant actuel (en GPS relatif), les coordonnées des sommets sont données par bande, à une translation près, ce qui nécessite un équipement au sol.

Cet article examine ce que peut apporter le GPS absolu. On s'appuie essentiellement ici sur les images prises à différentes échelles lors du vol de la caméra numérique sur Amiens en 2000. Outre l'utilisation de la caméra numérique développée par le LOEMI de l'IGN, cette mission a eu la particularité d'être accompagnée d'une mesure de la position de l'avion en GPS absolu.

Vol d'Amiens 2000

L'essai mené sur le vol d'Amiens 2000 a d'abord déçu, faute de connaître certains paramètres, de façon sûre. Cependant disons tout de suite que l'on peut obtenir de très bons résultats en planimétrie à condition que les bandes longitudinales soient volées en sens contraire. Par contre, il subsiste un biais en altimétrie.

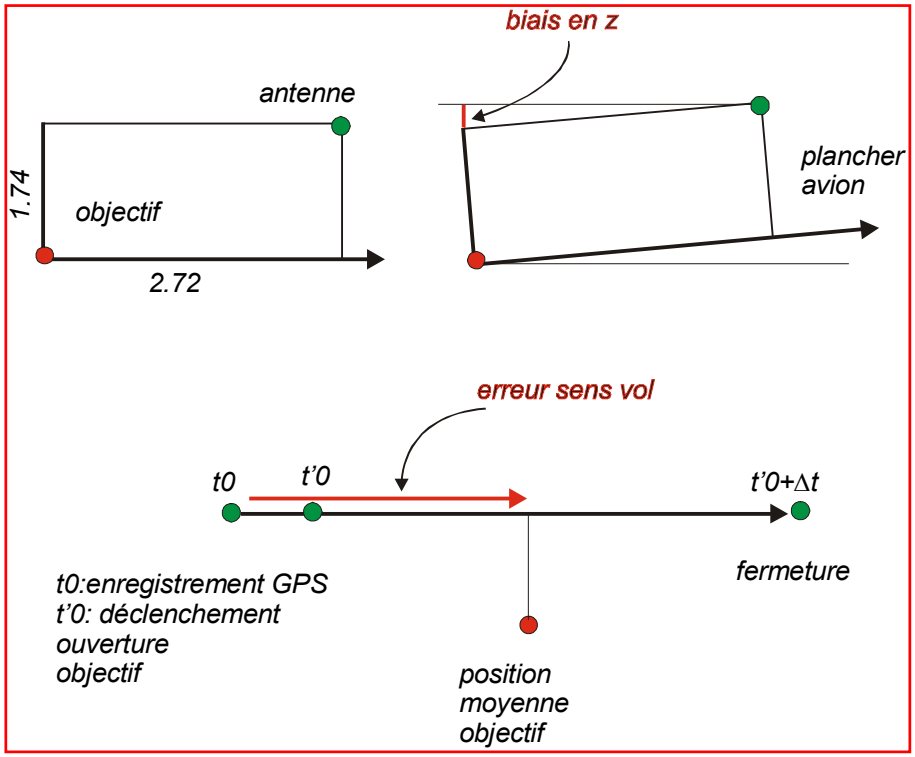


figure B.3.1

Le problème est le suivant :

- On ne connaît pas exactement la quantité à soustraire au z du point GPS pour obtenir l'altitude de l'objectif. L'antenne est en avant de l'objectif à la distance de 2,72 m. Or, l'avion est sans doute incliné en vol et une inclinaison de 5° pour une distance de 2,72 m correspond à un biais de 0,24 m. Ce biais est équivalent à une imprécision sur la focale. Dans le cas d'Amiens, le biais est de - 0,40 m, si les données sur le positionnement de l'antenne par rapport à l'objectif sont exactes. La focale est peut-être inexacte d'un peu plus d'un pixel. Il se pourrait qu'il y ait aussi un biais sur les données altimétriques GPS. Si la focale et les données GPS sont exactes, c'est alors que l'avion est incliné vers le bas.

- Il y a une erreur clairement liée au sens de vol qui atteint plus de deux mètres sur Amiens. On peut d'abord songer à une erreur de synchronisation entre le signal GPS (t_0) et le début t'_0 de l'ouverture de l'obturateur, à quoi il faut ajouter le demi-temps moyen Δt d'ouverture.

De t_0 à t'_0, l'avion se déplace d'une quantité Δl_1 et de t'_0 à $t'_0 + \Delta t$ d'une quantité Δl_2. La position moyenne de l'objectif correspond à $\Delta l_1 + \Delta l_2 /2$ qui est, en l'absence d'autres erreurs, égale à l'erreur de sens de vol. Mais, d'après le laboratoire OEMI, les temps $t'_0 - t$ et Δt seraient de l'ordre de 1 ms, avec une vitesse de 100 m/sec, il faudrait trouver 50 ms pour expliquer ces deux mètres. Il est peu probable, d'autre part, qu'il s'agisse d'une erreur d'étalonnage de la caméra (deux mètres correspondent à sept pixels). Y aurait-il alors un biais GPS en relation avec la variable temps ?

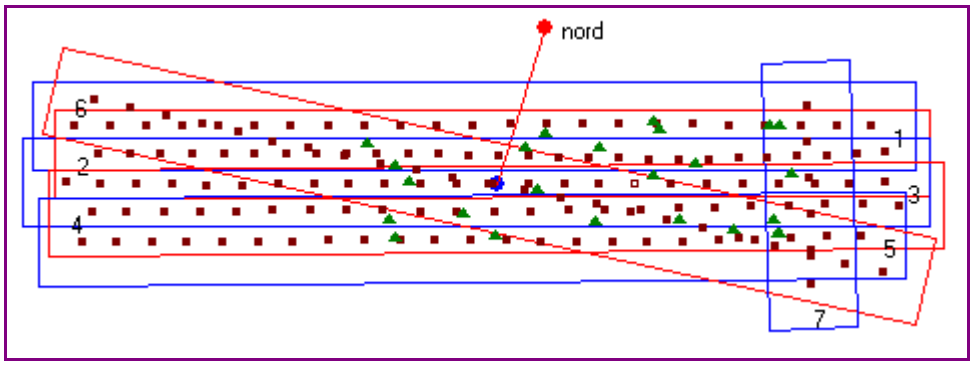


figure B.3.2 *Amiens 31 cm, GPS absolu. Les triangles verts sont des points de contrôle (inactifs dans les calculs). Focale 40 mm. Format 4 096 x 4 096 pixels. Altimétrie de vol 1 400 m. Pixel-terrain : 31 cm. Les points-terrain et les points GPS sont exprimés dans le Lambert 93. 25 000 points-image environ.*

Le biais en *z* est inaccessible en mode GPS absolu. Par contre, on peut parfaitement déterminer l'erreur de sens de vol si les bandes longitudinales sont volées en sens contraire. Ainsi, dans le cas de ce bloc et si on ne cherche pas à estimer l'erreur de sens de vol, on obtient à la sixième itération, les très médiocres résultats suivants :

tableau B.3.1 *: 0 appui-terrain. Sans estimation erreur sens de vol (unité mètre)*

	24 contrôles-terrain		*GPS*	
	emq_{xy}	emq_z	rmq_{xy}	rmq/z
mode GPS absolu	1,80	0,80	2,10	0,13

Cette extraordinaire médiocrité est due aux tensions entre bandes. Pour résoudre le problème, il suffit d'estimer l'erreur de sens de vol. Cela se fait très simplement en projetant les résidus de compensation aux points GPS sur la direction de vol. En quelques itérations supplémentaires, on arrive au but : l'erreur est évaluée à 2,32 m et les résultats tout à fait satisfaisants.

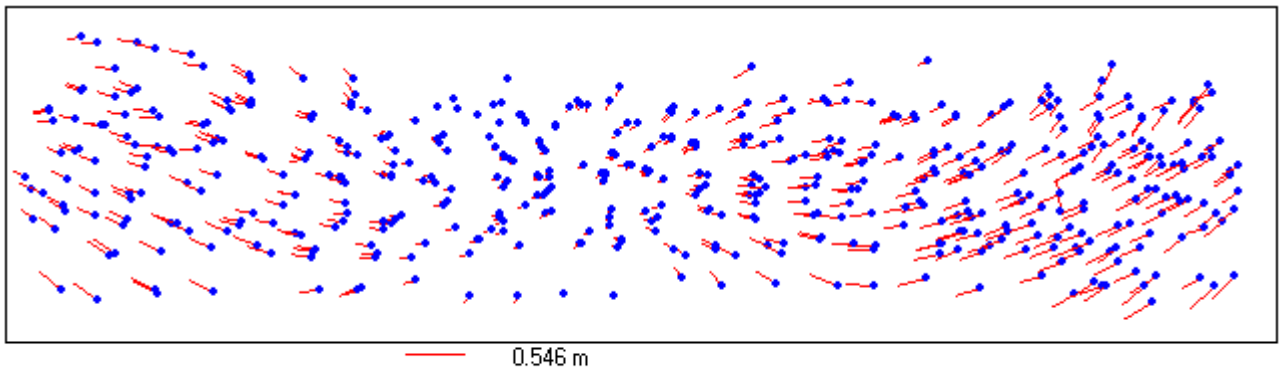
tableau B.3.2 *: après estimation erreur sens de vol (unité mètre)*

	24 contrôles-terrain		*GPS*	
	emq_{xy}	emq_z	rmq_{xy}	rmq/z
mode GPS absolu	0,30	0,24	0,02	0,07

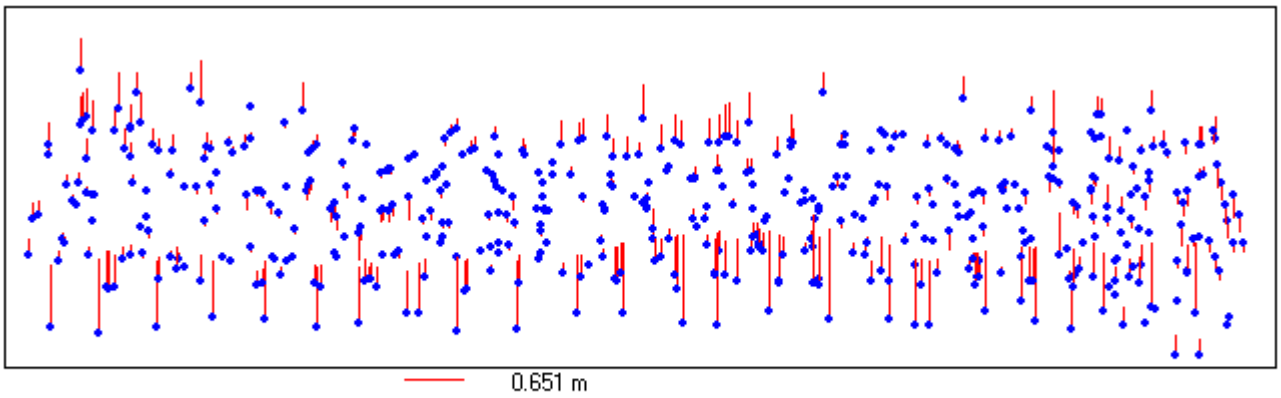
Ils sont tout à fait comparables à ceux obtenus en mode GPS relatif lorsqu'on tient compte du fait que la méthode d'estimation de l'exactitude sur des appuis flatte ici les résultats de l'ordre de 40% (Cette méthode consiste, en fin de compensation, à calculer les coordonnées 3-D des appuis sans tenir compte des données 3-D, on estime alors l'emq comme la moyenne quadratique des écarts (point 3D compensé - point terrain).

tableau B.3.3 *: en mode GPS relatif*

	24 appuis-terrain		*GPS*	
	emq_{xy}	emq_z	rmq_{xy}	rmq/z
mode GPS relatif	0,22	0,19	0,03	0,07



Plani 8259 points de liaison
Ecmq: 0.185; Ecart max: 2.434; HT: 2; ecmqSansHT= 0.182; biais en x: -0.14; en y: -0.064



Alti 8259 points de liaison
Ecmq: 0.261; Ecart max: 5.760; HT: 138; ecmqSansHT= 0.217; biais: 0.114

figure B.3.3 *: comparaison des écarts : mode GPS absolu (balise éloignée) moins GPS relatif (jeu GPS relatif). Noter les écarts importants en z au bord de la bande inférieure. Ils sont dus à la fragilité du mode GPS relatif en cas de canevas d'appui insuffisant.*

Remarques

1. Le traitement du bloc en mode GPS relatif (avec appuis-sol, bien entendu) avec le jeu GPS absolu fait très bien apparaître l'erreur sens de vol. Le tableau B.3.4 montre les translations-bandes, c'est à dire les corrections qu'il faut ajouter aux coordonnées GPS et au vecteur-antenne pour obtenir les coordonnées du sommet du faisceau, issue de deux logiciels *BottomAero* et *TopAero*.

tableau B.3.4

Traitement du jeu GPS absolu : balise lointaine, Lambert 93
en mode GPS relatif (avec appuis sol) : valeurs des translations-bande pour les sept bandes.
(Unité mètre. Vecteur-antenne - 2,72 ; 0,20 ; -1,26). Noter, en particulier, le résultat de la bande 6 qui est E-O.

1	-2,5	-0,5	0,0
2	2,2	0,8	0,0
3	-2,1	-0,7	0,0
4	2,4	0,3	-0,1
5	-1,3	-2,2	-0,4
6	2,4	0,0	0,0
7	-1,5	2,0	0,0

BottomAero

1	-2,2	0,0	-0,2
2	2,2	1,0	0,0
3	-2,2	-0,7	0,0
4	2,5	0,5	-0,2
5	-1,5	-1,9	-0,5
6	2,4	0,0	-0,1
7	-1,5	1,6	-0,2

TopAero

2. Les données d'Amiens étaient exprimées dans le Lambert 93. Lorsqu'on effectue les calculs en mode GPS absolu, il convient de tenir compte de ce fait et non pas de convertir ces données en euclidien, en assimilant localement la projection à une projection stéréo-graphique polaire, comme on fait souvent en mode GPS relatif.

Car si cela est sans conséquence en mode relatif, l'altération linéaire entre en jeu en mode GPS absolu et introduit un biais supplémentaire en *z*.

3. Pour cet essai, il y a eu un jeu de coordonnées GPS relatif et deux jeux de coordonnées GPS absolu. Pour le premier, la balise d'enregistrement était proche du chantier, et, pour l'autre, elle était éloignée. Les résultats ci-dessus concernent à la balise éloignée. Avec l'autre jeu, on obtient les mêmes résultats, au centimètre prés, sur les vingt-quatre points de contrôle et à quelques centimètres près la même erreur sens de vol. On observe cependant un décalage systématique entre les résultats au sol.

4. Ce décalage est induit par une distorsion entre les deux jeux de données GPS absolu. L'examen des données montre, pour toutes les bandes sauf la bande 7 (la bande transversale verticale), un écart (loin - proche) d'environ - 12 cm en x et de - 15 cm en y. L'écart en z reste faible mais variable. La bande 7 présente une anomalie assez grave : le décalage est en effet de - 48 cm en x, de - 56 cm en y et de 29 cm en z. C'est très probablement le jeu balise éloigné qui est biaisé, car si on met en place la seule bande 7 en mode GPS relatif, on trouve une meilleure mise en place avec le jeu balise éloignée.

La disposition des points-terrain (figure B.3.2) est mauvaise : les extrémités bandes ne sont pas équipées, non plus que les bords extrêmes des bandes supérieure et inférieure. On constate, ici, un avantage certain du mode GPS absolu : les écarts au sol entre les points issus des deux jeux GPS absolu sont bien plus homogènes que les écarts issus des jeux GPS absolu et GPS relatif.

tableau B.3.5

Estimation translation bande 7 en mode GPS relatif
après compensation. Les écarts constatés sont identiques à ceux des jeux de données.

	X	*y*	*z*
balise éloignée	-0,71	-0,39	0,00
balise proche	-1,20	-0,95	0,29

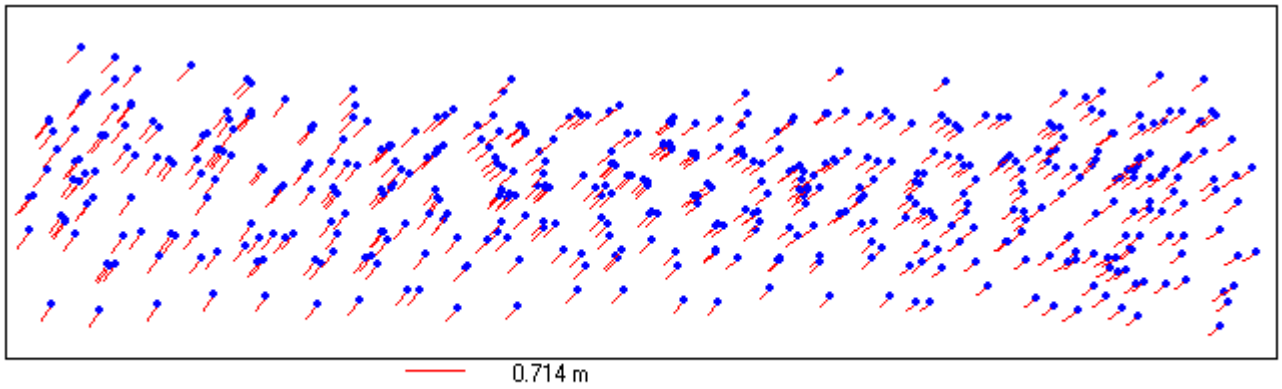


figure B.3.4 *: GPS absolu sans appui : écarts planimétriques au sol, selon qu'on utilise la balise proche ou la balise éloignée (balise éloignée moins balise proche). Comparer à la figure B.3.3, noter un accord bien meilleur en z en particulier sur le bord inférieur. Quant aux écarts en xy, ils sont bien plus homogènes et reflètent le biais entre les deux jeux.*

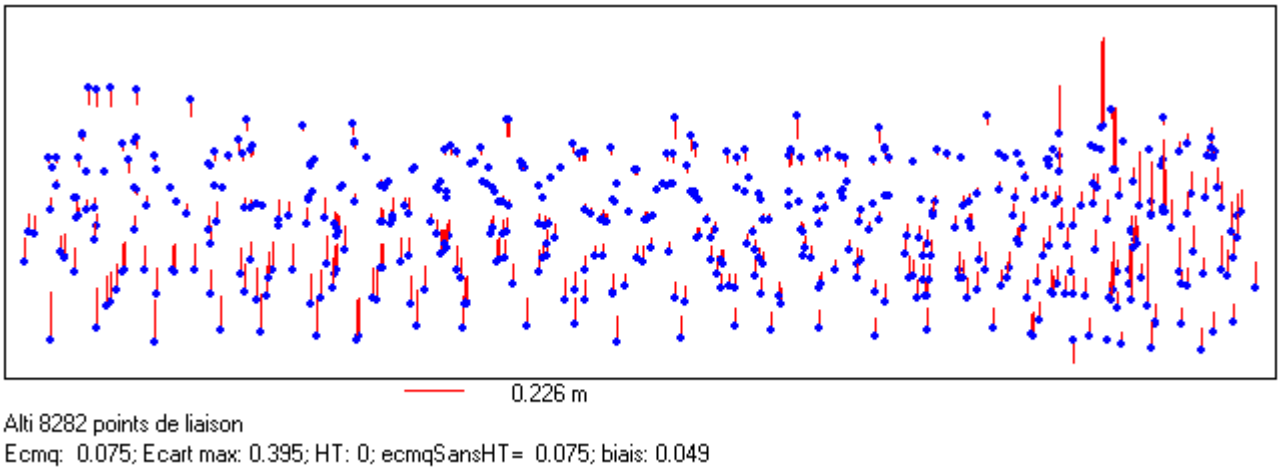
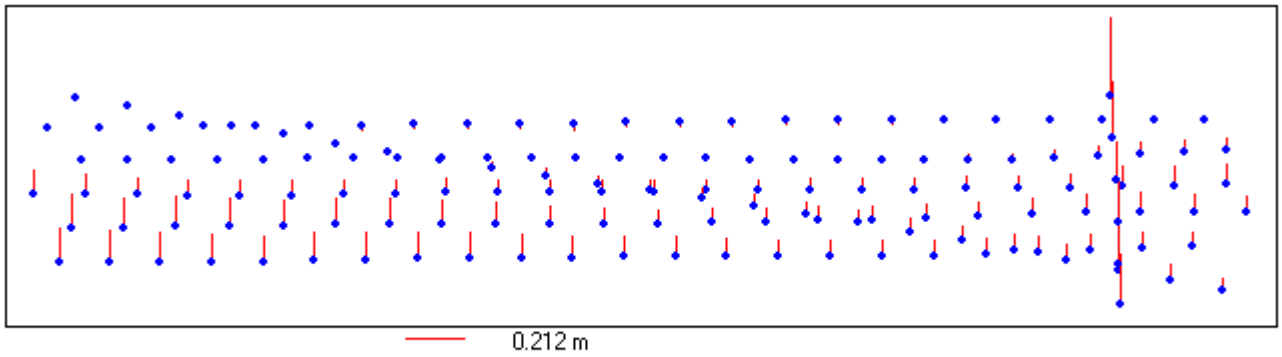


figure B.3.4 bis *: idem figure B.3.4 pour écarts altimétriques*



Le biais entre les deux jeux de coordonnée GPS apparaît clairement, il est peu acceptable sur la bande verticale.

***figure B.3.4 ter** : écarts aux sommets. Le biais entre les deux jeux de coordonnée GPS apparaît clairement, il est peu acceptable sur la bande verticale.*

5. Les bandes transversales n'apportent rien en mode GPS absolu. Les écarts moyens quadratiques évalués sur 7 000 points 3-D, entre les compensations avec et sans bandes transversales, sont 6,3 cm en planimétrie et 6,7 cm en altimétrie. Si l'on fait l'essai homologue avec le jeu GPS relatif et vingt-quatre appuis, on trouve 5,3 cm en planimétrie et 18 cm en altimétrie. Dans ce dernier cas, des écarts systématiques atteignant 40 cm sur les bords sont dus sans doute à l'insuffisance de l'équipement.

6. L'erreur du sens de vol apparaît aussi quand on utilise le jeu GPS relatif. Elle explique les distorsions entre les xy des translations-bande, car les bandes longitudinales sont volées en sens contraire.

7. Naturellement, le biais en z peut être résorbé avec quelques appuis en z. Ces appuis doivent figurer sur le plus grand nombre possible de clichés et donc plutôt dans la zone centrale du bloc. Ainsi, avec le vecteur-antenne (-2,72 ; - 0,2 ; -1,74), on trouve sans appui et sur vingt contrôles : 0,31 m pour l'emq en xy et 0,47 m en z. Quatre appuis au centre du bloc résolvent le problème du biais. On trouve finalement 0,27 m en xy et 0,26 m en z.

tableau B.3.6

Traitement du jeu GPS relatif (Lambert 93) :
valeurs des translations-bande pour les sept bandes (unité mètre, vecteur-antenne - 2,72 ; - 0,20 ; - 1,26).

1	-2,5	-0,5	0,0
2	2,2	0,8	0,0
3	-2,1	-0,7	0,0
4	2,4	0,3	-0,1
5	-1,3	-2,2	-0,4
6	2,4	0,0	0,0
7	-1,5	2,0	0,0

BottomAero

1	-2,2	0,0	-0,2
2	2,2	1,0	0,0
3	-2,2	-0,7	0,0
4	2,5	0,5	-0,2
5	-1,5	-1,9	-0,5
6	2,4	0,0	-0,1
7	-1,5	1,6	-0,2

TopAero

1	1,6	1,0	1,8
2	1,4	0,8	2,3
3	1,4	0,6	2,0
4	1,6	0,1	1,7
5	2,2	-0,6	1,5
6	1,6	0,4	1,7
7	0,9	0,0	1,7

après correction

À droite, les x et les y ont été corrigés de l'erreur sens de vol (2,30 m dans l'axe bande) et les z de – 0,5 m).

Mode inertiel + GPS absolu

C'est le rêve : plus d'aérotriangulation analytique. Finis, les dizaines de milliers de points-image retenus actuellement pour faire une compensation, c'est-à-dire justement pour déterminer les coordonnées des sommets des faisceaux et leur orientation dans l'espace.

L'ennui est que les précisions avancées par les fabricants semblent insuffisantes. Ainsi, la firme *Applanix* annonce 0,2° pour le cap et 0,03° pour roulis et tangage (soit respectivement 3,5 et 0,5 mrd) ceci en *real time*. Ce sont sans doute des tolérances et il faut alors diviser par trois. Mais, même pour une courte focale comme celles des caméras numériques (< 50 mm), on comprend vite - et les essais le confirment - que cela est insuffisant : 1 mrd à 50 mm correspond à 50 µm soit plus de sept pixels, si le pixel vaut 9 µm.

Dans le deuxième mode proposé par le fabricant, le mode re-traité, on annonce 0,05° pour le cap et 0,01° pour roulis et tangage (soit 0,8 et 0,17 mrd). S'il s'agit de tolérances, même pour une focale courte, et comparées au

processus actuel, c'est encore insuffisant. La simulation sur un bloc comme celui d'Amiens 31 cm montre que l'on obtient alors 0,24 m en planimétrie, ce qui est bien, mais 0,60 m en altimétrie, ce qui l'est beaucoup moins. D'autre part, il convient de ne pas oublier les deux problèmes signalés plus haut : le biais en *z* et l'erreur de sens de vol.

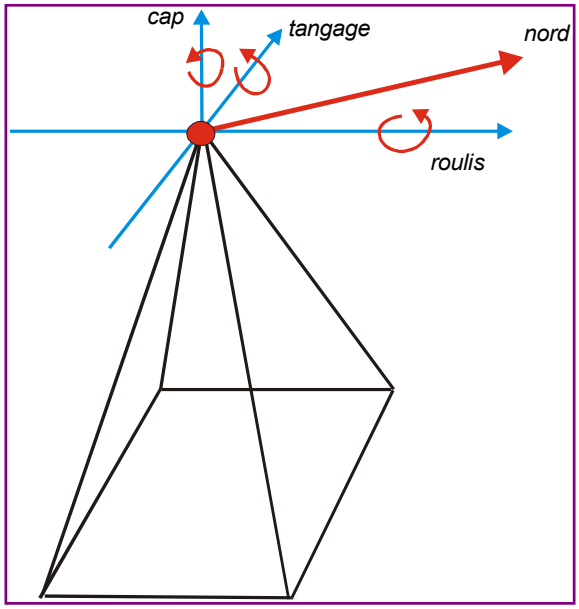


figure B.3.5

Mode avant-arrière

Le format de la caméra numérique du laboratoire OEMI est 4 096 x 4 096. Le côté du récepteur élémentaire est de 9 μm. La distorsion photogrammétrique est très forte : en bordure de champ, elle atteint 153 μm, soit dix-sept pixels avec une focale de 50 mm (ou même 40 mm), l'angle de champ est faible (40° pour 50 mm).

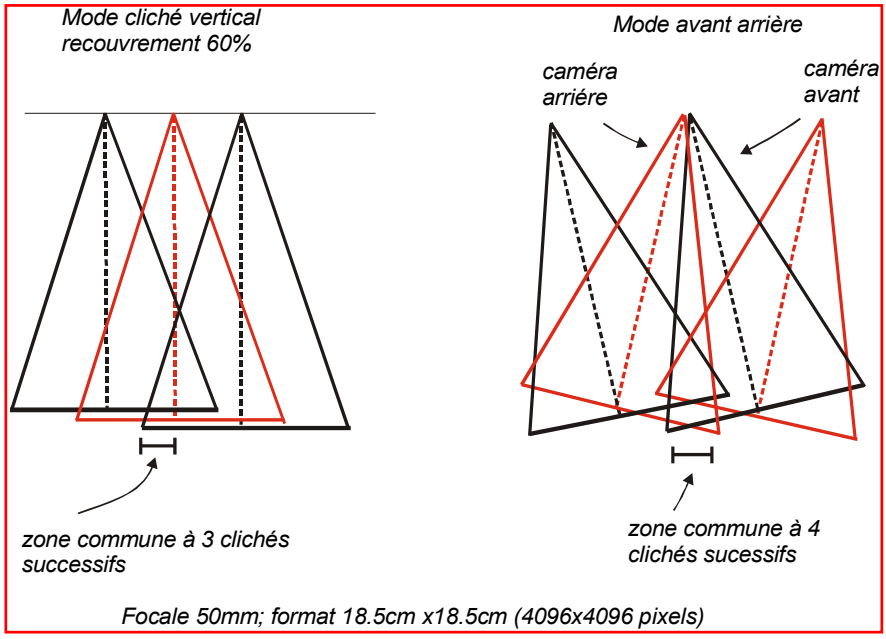


figure B.3.6

Ceci conduit à de faibles rapports base/hauteur de vue. D'autre part, les petites focales conduisent à des hauteurs de vol faibles donc à des surfaces couvertes faibles. Il suffit de comparer de ce point de vue avec les possibilités des caméras aériennes classiques : pour le même pixel-terrain, disons 25 cm avec une caméra argentique de focale 150 mm (résolution 25 μm = 1 pixel, échelle 1 : 10 000) et un format 200 x 200 mm (8 000 x 8 000 pixels).

On couvre avec un recouvrement de 60% un rectangle 2 000 x 1 200 m et le rapport base/hauteur de vue est de 0,53. Avec une caméra numérique de focale 50 mm (pixel-image de 9 μm, échelle 1 : 28 000), et avec le même recouvrement, on couvre 1 000 x 600 m, soit une surface quatre fois moindre et le rapport base/hauteur de vue n'est que

de 0,28. D'où l'idée d'associer deux caméras inclinées, une caméra avant et une caméra arrière avec un léger recouvrement : la surface couverte double (1 000 x 1 200 m), ainsi que le rapport base/hauteur de vue (Cf. figure B.3.6).

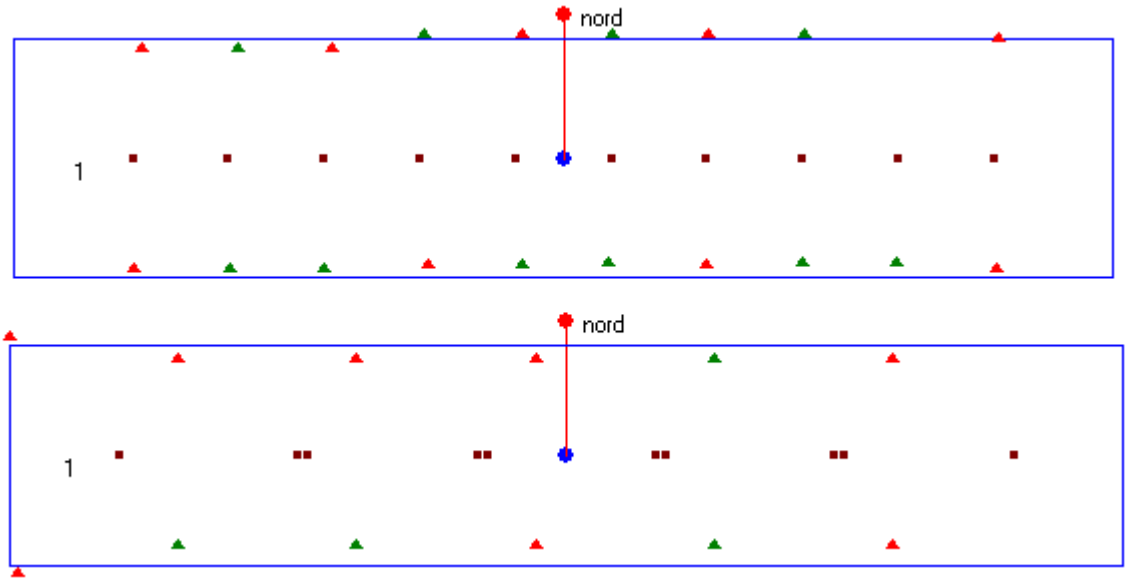


***figure B.3.7** : en haut, une bande de dix clichés en mode vertical, en bas en mode avant arrière. En mode vertical, la base est d'environ 400 m contre 800 m en mode avant arrière (focale 51 mm, format 4 096 x 409, pixel 9 μm, altimétrie de vol 1 400 m).*

Simulations

Elles ont été faites pour une caméra numérique de focale 51 mm pour la caméra arrière, 52 mm pour la caméra avant, avec un format de cliché 4 096 x 4 096 pixels. L'altimétrie de vol était de 1 400 m sur Amiens. Dans ces conditions, le pixel-terrain vaut environ 25 cm. Les coordonnées des points-image ont été bruitées avec une emq de 0,33 pixel et les données GPS avec une emq de 15 cm en planimétrie et en altimétrie.

On a pris un bloc de six bandes de vingt clichés et envisagé deux cas : un recouvrement interbande de 20% et un recouvrement interbande de 60%. Les résultats évalués, sur une centaine de points de contrôle, figurent dans le tableau B.3.7 :

***tableau B.3.7** : cas d'un bloc de six bandes de vingt clichés*

mode	recouvrement interbande	emq xy (en m)	emqz (en m)
vertical	20%	0,08	0,19
avant-arrière	20%	0,09	0,16
vertical	60%	0,08	0,20
avant-arrière	60%	0,07	0,14

On s'attendait à un accroissement de l'exactitude en altimétrie, c'est effectivement le cas. Mais cet accroissement est moins fort que ne le laisse espérer la formule théorique. En divisant le rapport b/h par deux, on devrait obtenir une exactitude deux fois meilleure, mais cette formule ne vaut que pour des points de couple et dans le cas de nos simulations la majeure partie des points appartient à plus de deux clichés. Quand on fait les simulations avec une seule bande, l'accroissement d'exactitude est de l'ordre de 50%.

***tableau B.3.8** : cas d'une seule bande de vingt clichés*

mode	emq xy (en m)	emqz (en m)
vertical	0,18	0,40
avant arrière	0,18	0,22

Les modifications à apporter au logiciel pour lui permettre d'absorber le mode avant-arrière peuvent se réduire à peu de chose : essentiellement, à une mise en place des faisceaux tenant compte de l'inclinaison relative des axes optiques avant et arrière. Il faut, de plus, tenir compte des caractéristiques des deux caméras, ainsi que de la distance entre les deux centres optiques.

On peut aussi tenir compte du fait que les deux caméras forment un ensemble rigide, ce qui *a priori* est plus élégant. Dans ce cas, on diminue le nombre d'inconnues de faisceaux par deux, mais il y a un problème à résoudre : il faut pouvoir apprécier par le calcul l'imprécision sur les données d'orientation relative des deux caméras résultant de leur mise en place en atelier : un défaut d'orientation de 0,001 rd non corrigé conduit à des résultas inacceptables.

C'est tout à fait possible, mais oblige à des précautions : les trois inconnues de systématisme permettant de résoudre ce problème ne peuvent être introduites dans les équations que lorsque les inconnues de translation-bande sont devenues stables. Cependant, les simulations effectuées par cette méthode (un peu délicate à mettre au point) n'ont pas montré d'améliorations significatives.

Bandes transversales ?

Pour un bloc équipé en GPS relatif, les appuis ont essentiellement pour fonction de permettre d'estimer les translations-bande. La remarque a été faite, depuis un certain temps, qu'un très petit nombre d'appuis pourrait suffire mais qu'il est souhaitable - pour éviter le pivotement des bandes autour de leur axe - de prévoir des bandes transversales.

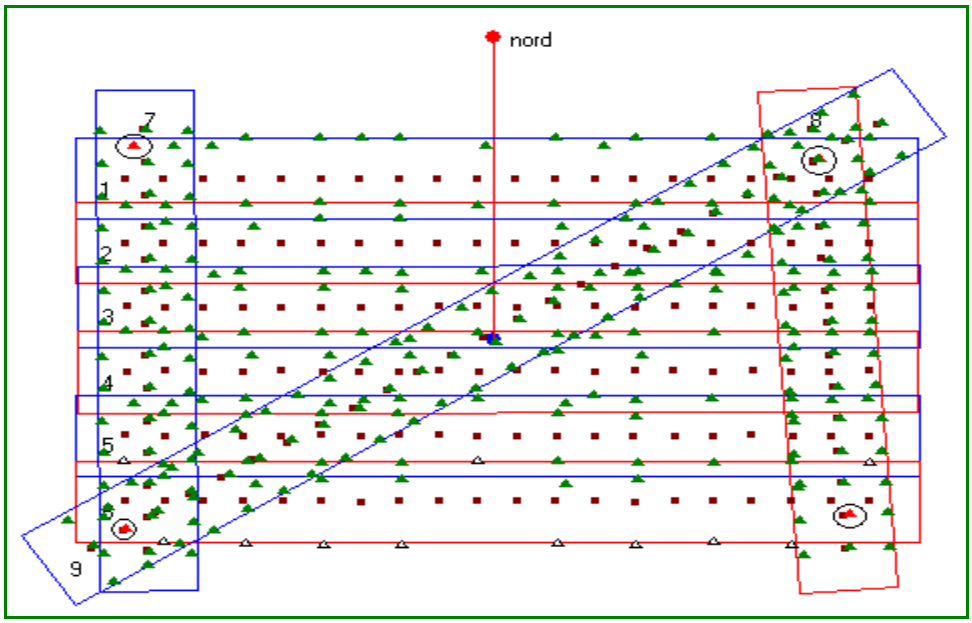


figure B.3.8 *Bandes transversales : quatre appuis seulement aux quatre coins (focale 50 mm, caméra numérique 4 096 x 4 096 pixels, altimétrie 1 400 m, pixel-terrain 25 cm). Recouvrement interbande de 20% : on trouve 0,103 m en xy et 0,365m en altimétrie.*

Les simulations le confirment. Celles du tableau B.3.9 ont été faites avec les hypothèses suivantes : emq planimétrique de 15 cm et emq altimétrique de 15 cm, tant pour les données GPS que pour les données relatives aux appuis, emq de pointé sur les points-image de 0,33 pixel. On a pris un bloc numérique avec un recouvrement interbande de 20% (figure B.3.8).

La disposition avec deux bandes transversales verticales et une diagonale semblent être effectivement la plus favorable. Mais si on reprend les essais avec un recouvrement interbande de 60%, le gain n'apparaît guère. En mode GPS absolu, les simulations montrent qu'il est nul. Il ne s'agit que de simulations, mais cela confirme l'essai fait avec le bloc réel d'Amiens 31cm : voir la remarque 5 page 51.

Cependant, il y a un contre-exemple : Amiens 25 cm (voir paragraphe suivant). Bien que le recouvrement interbande soit très fort, la présence des deux bandes transversales s'avère indispensable quand on réduit le canevas d'appui à quatre points (un dans chaque coin), du moins quand on traite l'ensemble des 50 000 points-image. Après un filtrage où on ne conserve que 7 000 points, il n'y a plus de différence avec ou sans bande transversale (voir tableau B.3.12).

tableau B.3.9

Recouvrement interbande de 20%

Bandes transverses	*appuis*	emq_{xy}	emq_z
0	**45**	**0,18**	**0,28**
0	1	0,38	2,20
0	2	0,36	0,53
0	4	0,30	0,63
2 verticales	4	0,23	0,31
3 verticales	4	0,21	0,34
2 verticales - 1 diagonale	4	**0,22**	**0,26**

Recouvrement interbande de 60%

Bandes transverses	*appuis*	emq_{xy}	emq_z
0	**38**	**0,19**	**0,23**
0	1	0,25	2,50
0	2	0,20	0,27
0	4	0,21	0,31
2 verticales	4	0,21	0,25

À gauche : résultats obtenus (moyenne de quatre essais) avec le bloc de la figure B.3.9.
À droite : pour un bloc de six bandes également mais avec un recouvrement interbande de 60%.

NB : Les appuis dans ces essais ont été choisis dans les quatre coins du bloc et non pas comme en mode GPS absolu au centre du bloc (voir page 51 remarque 7).

Le systématisme

Il provient, sans doute, essentiellement d'une insuffisance d'étalonnage de la caméra. Il peut y avoir un biais sur la focale et la position du point principal ainsi que des erreurs résiduelles importantes sur la distorsion. Pour les caméras numériques du laboratoire OEMI, cette distorsion est très importante. En GPS relatif avec appuis, il n'est pas question (en tout cas, en terrain plat) de déterminer une correction de focale ni une correction de point principal car les erreurs correspondantes sont absorbées par les translations-bande.

Par contre, le systématisme résiduel cliché peut être évalué et corrigé dans tous les cas. Il est modélisé par neuf vecteurs aux sommets d'une grille 3 x 3 superposée au cliché l'interpolation au sein d'un des neuf carreaux se faisant par spline d'ordre 2, il y a donc dix-huit inconnues mais il convient de poser trois conditions :

- pas de changement d'échelle (qui correspond à une variation de focale) ;
- pas de translation (qui correspond à un biais sur le point principal) ;
- pas de rotation.

Il y a ici une remarque à faire : ces inconnues sont souvent peu efficaces s'il y a de nombreux appuis bien répartis, car alors ces appuis empêchent le systématisme de se propager. On ne s'aperçoit de l'existence de ce systématisme que si le nombre d'appuis est faible et c'est là que leur emploi s'avère intéressant. Ainsi, pour le bloc numérique réel Amiens 25 cm (tableau B.3.10, page suivante) qui comporte vingt-cinq appuis en xyz et vingt appuis en z, on observe, avec tous les appuis, un gain de 20% en altimétrie avec les inconnues de systématisme, mais si on ne prend que quatre appuis et si on conserve les bandes transversales le gain pour les points connus en z seulement est de 50%. Les chiffres du tableau B.3.10 sont les moyennes de quatre essais correspondant à des choix différents des quatre appuis.

Pourquoi le gain est aussi important pour les points connus en z seulement ? Cela reste une énigme : les contrôles connus en z seulement figurent, en moyenne, sur autant de clichés que les contrôles connus en xyz mais ont été pointés lors d'une seconde opération et avec une moindre précision. On peut alors avancer l'explication suivante :

- de toute façon, l'exactitude obtenue est limitée quelque soit le nombre de points-image par point 3-D ;
- les mesures-image correspondant à un contrôle connu en z seulement sont moins précises ;
- mais quand on introduit les inconnues de systématisme, le nombre de mesures corrigées est alors suffisant pour obtenir l'exactitude limite.

On notera que le résultat obtenu avec deux bandes transversales et quatre appuis (dans les coins) est - avec les inconnues de systématisme - identique à celui obtenu avec tous les appuis. Par contre (comparer avec le tableau B.3.9) sans bandes transversales le résultat est mauvais en *z*.

Remarques

Quand on corrige les coordonnées des points-image du systématisme, on trouve directement les bons résultats. Si l'on essaie d'évaluer à nouveau le systématisme résiduel par la même méthode, on le trouve fortement réduit et non significatif (de 0,42 pixel maximum, il passe à 0,12 pixel maximum). Par ailleurs, on trouve à 0,02 pixel près, les mêmes résultats que l'on opère sur tous les appuis (vingt-cinq en xyz et vingt en z) ou sur quatre appuis seulement.

***tableau B.3.10** : Amiens 25 cm*

	Syst	*emq*	emq_z	$emq_{zSeulement}$
2 bandes transversales - 25 appuis xyz, 20 z seulement	non	0,14	0,15	0,17
	oui	0,11	0,12	0,16
2 bandes transversales - 4 appuis xyz	non	0,20	**0,28**	**0,41**
	oui	0,19	**0,22**	**0,22**
0 bande transversale - 25 appuis xyz, 20 z seulement	non	0,15	0,35	0,36
	oui	0,12	0,32	0,33
0 bande transversale - 4 appuis xyz	non	0,21	0,69	0,74
	oui	0,21	0,66	0,70

Gain apporté par les inconnues de systématisme. L'apparent gain d'exactitude en z (15 cm au lieu de 35 cm avec l'équipement appuis maximal) avec les bandes transversales n'est pas confirmé par les simulations.

Si on utilise les inconnues de systématisme, il est *a priori* indiqué de corriger les coordonnées-cliché de ce systématisme dans toutes les applications ultérieures. Cependant, si on ne corrige pas les coordonnées-clichés du systématisme calculé, l'incidence est faible pour les points 3-D se trouvant sur de nombreux clichés. Par exemple, avec Amiens 25 cm, deux bandes transversales et quatre appuis seulement, que l'on corrige ou non les coordonnées-cliché du systématisme trouvé (qui atteint 0,4 pixel), on trouve les mêmes résultats : 0,20 m sur les points de contrôle mais ceux-ci appartiennent en moyenne à plus de dix clichés ; mais il y a quelques écarts importants en z (avoisinant le mètre) relatifs à des points de couple situés prés d'un bord cliché, là où le systématisme est le plus fort.

Que l'on corrige ou non le systématisme, souvent - mais pas toujours - : voir Amiens 25 cm ou Antifer, tableau B.3.11, on ne s'en aperçoit guère sur les points de contrôle ou d'appui, ce qui fait croire à son inefficacité. En effet, contrôles et appuis se trouvant sur plus de six clichés en moyenne, les erreurs de systématisme se compensent, mais la comparaison des déterminations fait toujours apparaître des écarts significatifs en bord de bloc là justement où le nombre de points-image par point 3-D est le plus faible.

tableau B.3.11

	sans systématisme		*avec systématisme*	
Amiens 25 cm tout appui (24)	0,14	0,15	0,11	0,12
Amiens 31 cm tout appui (24)	0,22	0,19	0,21	0,22
Amiens 50 cm (17 xyz, 2 z)	0,97	0,37	0,96	0,38
SPCN 1507 (46 xyz, 192 z)	0,32	0,29	0,28	0,26
Antifer tout appui (56 xyz, 350 z)	0,40	0,47	0,32	0,30

Nombre points-image

Il semble très fortement exagéré pour les couvertures numériques : pourquoi 54 000 points-image sur le bloc Amiens 25 cm (deux cents quarante clichés : plus de deux cents points-image par cliché) alors que six à sept fois moins suffisent largement. Au delà de trente points-image par cliché (un cliché dépend de six paramètres), les erreurs ne se compensent plus.

On bute sur les limites imposées par la résolution et les erreurs systématiques résiduelles. Il semble, au contraire, que cela ne génère que des inconvénients : l'excès de mesures-cliché peut empêcher les moindres carrés de fonctionner correctement en faussant de façon irréaliste les poids relatifs des diverses catégories de mesure. Il est frappant, qu'en réduisant les points image à cinq par ligne nadirale (en tout : 8 900 points), l'on obtienne les mêmes résultats, et, que, les bandes transversales cette fois n'apportent rien. De plus, en cas de problèmes délicats, ils conduisent pour le logiciel *TopAero* à multiplier les itérations et à des instabilités en mode GPS relatif.

tableau B.3.12

	pts-image	*transv.*	emq_{XY}	emq_Z	$ecmq_{XY}$	$ecmq_Z$
Amiens 25cm 25 xyz, 19 z	54 000	oui	0,14	0,16		
	89 00	oui	0,09	0,17	0,07	0,11
	49 400	non	0,15	0,35	0,05	0,41
	8 200	non	0,10	0,16	0,07	0,12
Amiens 31cm 24 xyz	25 300	oui	0,21	0,21		
	3 750	oui	0,20	0,17	0,08	0,15
	20 900	non	0,21	0,22	0,06	0,18
	2 900	non	0,21	0,16	0,08	0,19
Amiens 50cm 17 xyz, 2z	69 800	oui	0,97	0,35		
	19 600	oui	0,95	0,40	0,29	0,36
	11 000	oui	0,93	0,40	0,32	0,40
	67 400	non	0,98	0,40	0,06	0,51
	19 200	non	0,95	0,43	0,28	0,44
	10 700	non	0,94	0,40	0,31	0,49

Exactitude obtenue en diminuant le nombre de points-image unité m), emq_{XY} et emq_Z sont estimées Sur les appuis ; $ecmq_{XY}$ et $ecmq_Z$ sont les écarts moyens quadratiques sur l'ensemble des points 3-D en prenant comme référence le premier essai (maximum de mesures, bandes transversales). Pour chaque essai, six itérations, pas d'inconnues de systématisme.

NB *: pour Amiens 50 cm, la double bande transversale de droite a été éliminée : tant par* TopAero *que par* BottomAero*, elle conduit à de très graves anomalies.*

Conclusions et remarques terminales

Comparaison des logiciels *TopAero* et *BottomAero*

Le tableau B.3.13 compare les deux logiciels sur des blocs correctement équipés. Les emq en xy et z sont estimées sur les appuis-réseau (en fin de compensation le point 3-D correspondant est calculé sans tenir compte des coordonnées terrain). Dans l'ensemble, les résultats concordent. Néanmoins, on constate une petite faiblesse de *TopAero* en planimétrie. D'ailleurs une sorte défaut de conception pour les fautes très grossières rend son emploi parfois difficile.

Tous les essais ont donc été faits à partir de fichiers de points-image issus de *BottomAero* qui réagit plus sainement aux erreurs grossières. Signalons aussi une autre source d'erreur (corrigée dans la version actuelle de *BottomAero*) : la multiplication des clichés (fort recouvrement inter-cliché et fort recouvrement interbande) fait qu'il arrive que des points, après mise hors course des très grosses fautes, se retrouvent, par exemple, sur deux ou trois clichés en rapport b/h extrèmement faible, d'où des déterminations fantaisistes (dans *BottomAero*, on exige l'existence d'au moins un rapport b/h > 0,15, sinon le point est inactivé).

GPS absolu

En l'absence d'appuis-sol on obtient la planimétrie exacte, si les bandes sont volées en sens alterné. Par contre, il subsiste un biais en z. En fait, on devrait pouvoir résoudre ce problème : est-ce l'étalonnage de la chambre ou l'Inclinaison de l'avion ? L'idéal, évidemment, serait de faire coïncider l'antenne avec la caméra. Ce n'est peut-être qu'une question de temps et d'argent.

La substitution du GPS absolu au GPS relatif ne présenterait de toute façon que des avantages :

- suppression des translations-bande dont on ne sait jamais quelle homogénéité elles doivent présenter, ce qui peut laisser passer des erreurs graves,
- inutilité des bandes transversales et
- réduction considérable du canevas d'appui (4-5 appuis figurant sur un nombre suffisant de clichés et pouvant se trouver même rapprochés, par exemple dans la zone centrale du bloc).

tableau B.3.13

	BottomAero		*TopAero*			*BottomAero*	
Bloc	EmqXY	emqZ	emqXY	emqZ	échelle	échec points 3-D	Fautes points image
Test argentique	0,28	0,31	0,29	0,34	1 : 30 000	0/459	3/1 410
SPCN 1507	0,32	0,29	0,43	0,27	1 : 25 000	1/1 278	18/5 060
Antifer	0,40	0,47	0,75	0,40	1 : 30 000	0/4 084	29/4 084
					pixel		
Amiens 25cm (2001)	0,14	0,16	0,20	0,23	25 cm	470/10 350	3 640/54 000
Amiens 31cm (2001)	0,21	0,21	0,29	0,22	31 cm	216/8 200	1 080/25 000
Amiens 50cm (2001)	0,97	0,35	1,00	0,45	50 cm	36/4 800	2 000/70 000

Les trois premiers blocs sont argentiques, les autres sont numériques.

Mode inertiel

Les précisions annoncées par les constructeurs semblent insuffisantes : il faut une précision pour les trois composantes angulaires qui soit comparable à celle du rayon perspectif (rapport emq pointé/ focale : par exemple, pour une caméra numérique de focale de 51 mm, un pixel de 9 μm, une emq de pointé de 0,33 pixel il faudrait une emq de 0,06 mrd. Pour une caméra argentique de focale de 150 mm et pour une emq de pointé de 5 μm, il faudrait une emq de 0,035 mrd). On en paraît loin. Il faudrait, d'autre part, pour qu'on puisse se passer totalement de mesures-cliché être assuré de l'inexistence de tout biais.

Mode avant-arrière

Aucun problème : on double la surface utile par couple et on améliore l'exactitude en *z*.

Bandes transversales

Elles semblent sans aucun intérêt pour un équipement en GPS absolu, avec un équipement en GPS relatif sont très intéressantes en cas de faible canevas d'appui. Deux appuis dans chaque coin du bloc semblent alors largement suffire.

Systématisme

Il est indiscutablement présent, simplement, il ne se manifeste pas pour les points 3-D se trouvant sur de nombreux clichés.

Type de projection

Sa méconnaissance est parfois sans influence sur les résultats quand on opère en GPS relatif et qu'on exploite des données cartographiques. Il n'en est pas de même si on opère en GPS absolu, où il faut impérativement en tenir compte : par exemple prendre du Lambert 93 quand il s'agit d'un autre Lambert donne de très mauvais résultats. Mais même en GPS relatif, sa méconnaissance entraîne des mécomptes : le laboratoire MATIS exploite ainsi des données euclidiennes : or, ces données ne sont rigoureusement euclidiennes que si on tient compte dans les calculs d'aéro-triangulation du type de projection.

Signalons que les données d'orientation des faisceaux peuvent être données en cartographique et permettent alors d'évacuer le problème de la projection dans les opérations aval.

Un relèvement dans l'espace est effectué en fin de compensation pour chaque cliché sur tous les points compensés cartographiques. Le calcul montre que cela n'entraîne aucune erreur sensible si le relief n'est pas trop fort sur un couple (il faut $\Delta h < R\sigma/F$ ou R est le rayon terrestre, σ est l'emq de pointé et F est le format, par exemple : pour un format 4 096 x 4 096, un pixel de 9 μm, il faut $\Delta h < 650$ m ; pour un cliché argentique de format 200 mm, avec $\sigma = 5$ μm, il faut $\Delta h < 150$ m).

Nombre de points-image

Trente points-image par cliché suffisent largement. Le taux de fautes de mesures des coordonnées-image dans le processus actuel de mesure par corrélation automatique ne dépasse pas 7%. A quoi bon en prendre deux cents ou trois cents par cliché ?

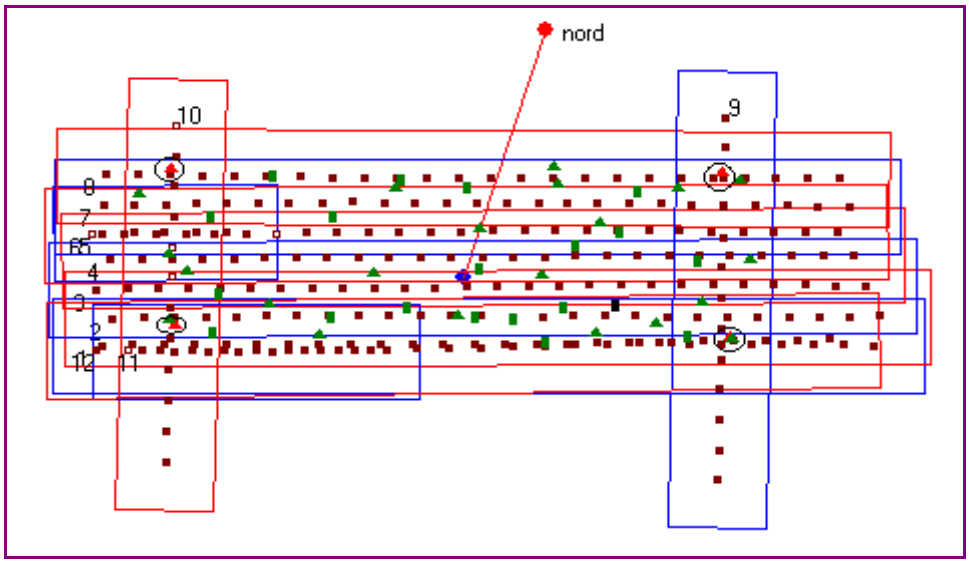
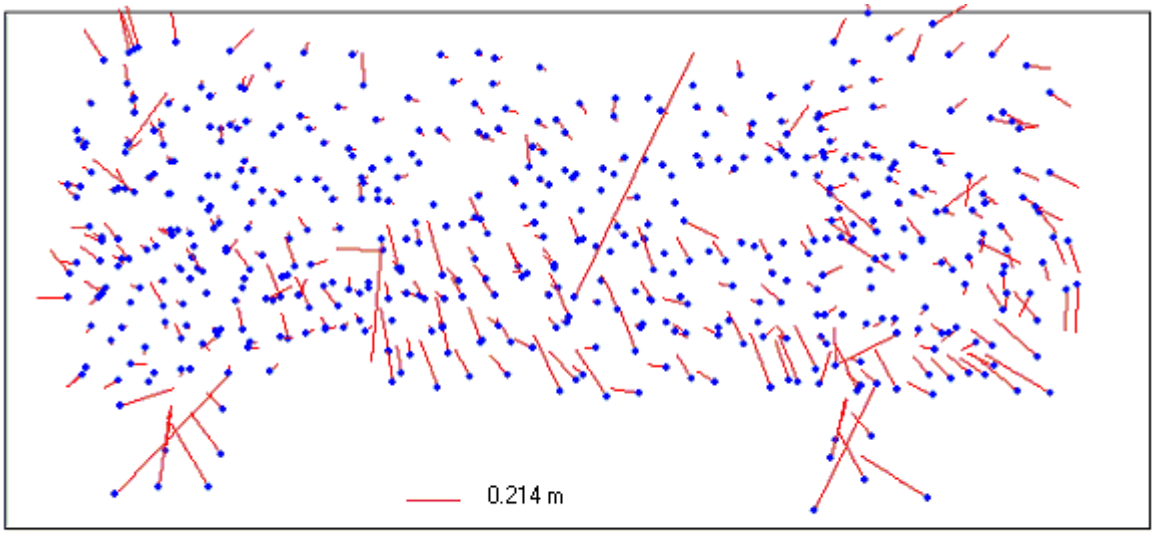
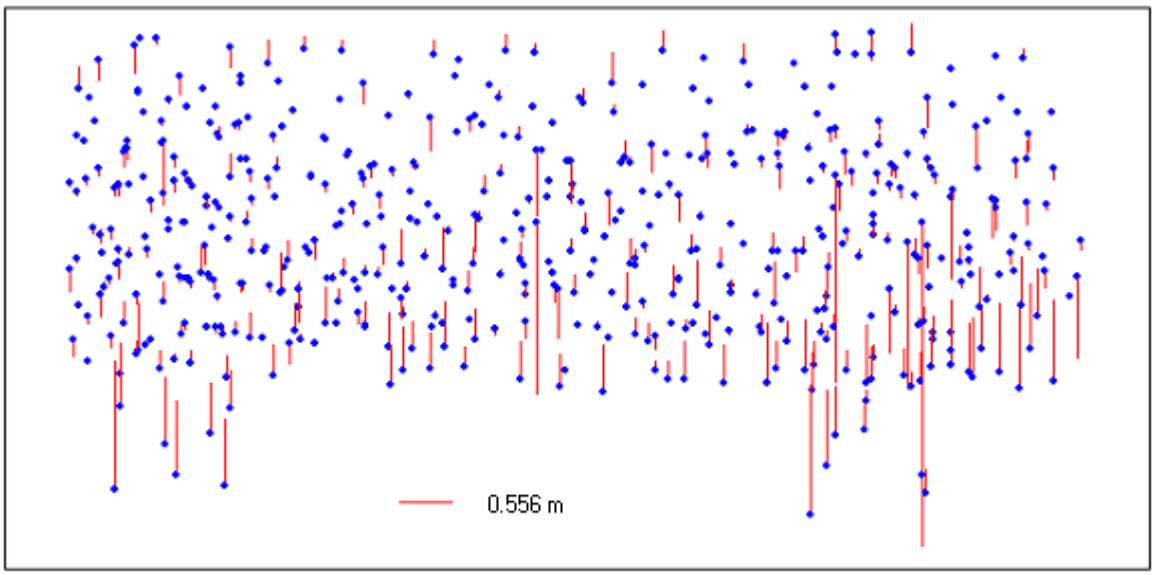


figure B.3.9 *: Amiens 25 cm (15 appuis xyz, 20 appuis z).*



Plani 10197 points de liaison
Ecmq: 0.110; Ecart max: 1.772; HT: 574; ecmqSansHT= 0.071; biais en x: -0.02; en y: 0.025

figure B.3.9 bis *: bloc avec inconnues de systématisme - bloc sans. Écarts planimétriques.*



Alti 10197 points de liaison
Ecmq: 0.311; Ecart max: 8.134; HT: 362; ecmqSansHT= 0.185; biais: 0.038

figure B.3.9 ter *: bloc avec inconnues de systématisme - bloc sans. Écarts altimétriques.*

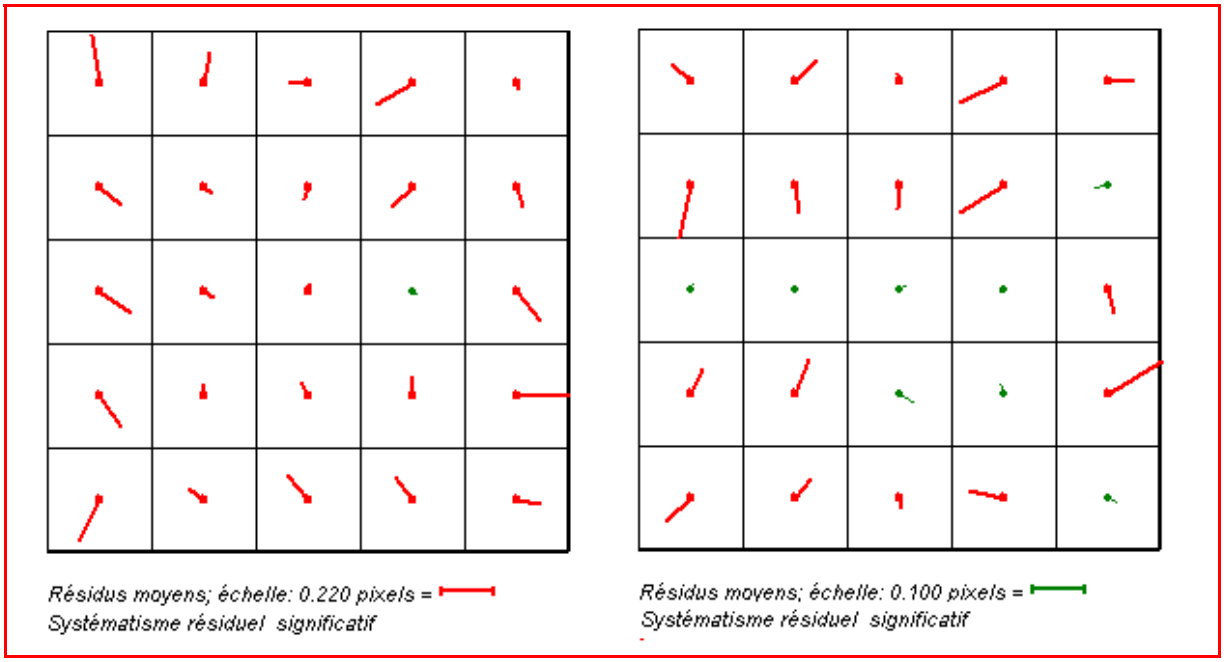


figure B.3.10 *: Amiens 25 cm. Le systématisme résiduel avant introduction des inconnues de systématisme et après.*

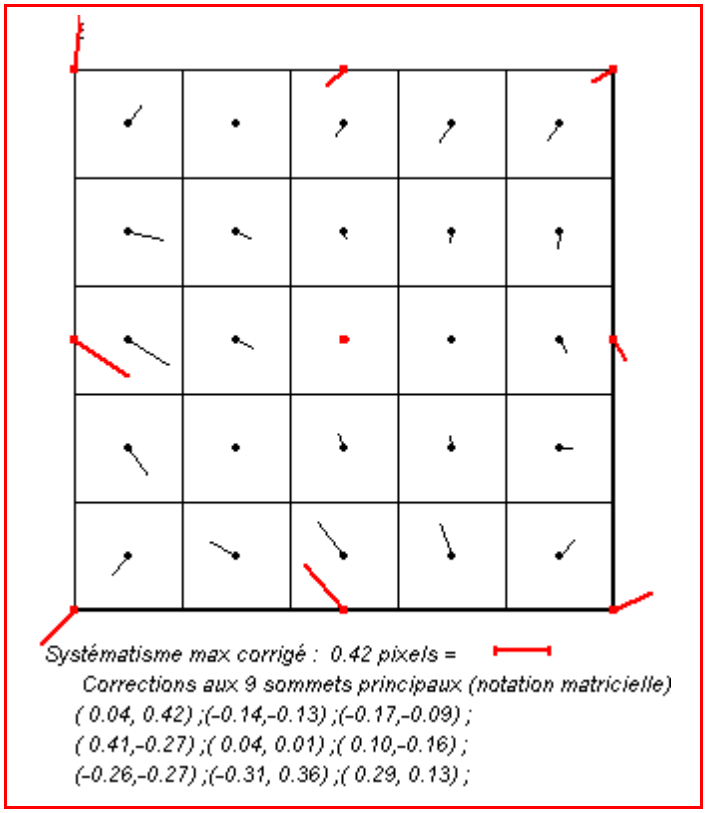


figure B.3.10 *: Amiens 25 cm : le systématisme corrigé*

Publication

[HOTTIER 01] Philippe Hottier : *Aérotriangulation analytique : BottomAero*, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-0XX/C-RAP-PH, juin 2001.

B.4 Un environnement de conception coopérative d'utilisations de données géographiques

Bénédicte Bucher

Le travail présenté ici traite le problème de l'accès d'utilisateurs à l'exploitation de données géographiques. Notre objectif est d'aider un utilisateur face à des Bases de Données Géographiques, à déterminer quels lots de données exploiter, et de quelle façon, pour dériver une information pertinente pour lui. Nous détaillons dans une première partie la problématique traitée. La partie suivante présente notre approche. Elle est suivie d'un exemple qui illustre la mise en œuvre de l'approche. Nous concluons ensuite sur les apports de ce travail et les suites en cours.

Aider l'accès à l'information géographique

La problématique de l'accès à l'information géographique

L'homme a toujours eu besoin de représentations de portions du monde géographique pour avoir une appréhension de ce monde dépassant sa propre perception et de meilleures possibilités de raisonnement. Les bases de données géographiques numériques (BDG) sont de telles représentations. Elles sont généralement construites pour une application spécifique comme la production de cartes papier, mais peuvent souvent être utiles au-delà de cette application. L'éventail de ces utilisateurs peut, par ailleurs, s'élargir du fait de la vulgarisation des logiciels de manipulation de ces données et du fait du développement des techniques de diffusion physique de l'information. Il est donc important de mettre ces données à la disposition de leurs utilisateurs potentiels. L'accès d'utilisateurs potentiels à l'information géographique contenue dans des BDG est difficile, en raison de l'écart entre l'expression du besoin et la sélection de données utiles pour y répondre. Nous détaillons ci-dessous les éléments contribuant à cet écart, résumés sur la figure B.4.1, ci-dessous.

Lorsque le besoin est traduit en un besoin de contenu et de fonctions, un problème extrêmement complexe demeure : choisir le format de données et le SIG les mieux adaptés pour répondre à ce besoin. Ce choix implique des compromis, des tests sur des jeux de données véritables. Le choix d'un SIG est un problème extrêmement complexe. Ce problème n'est actuellement pas encore optimisé au cas par cas et nous ne pouvons envisager de proposer un système générique d'aide au choix d'un SIG. Par contre il est possible de désigner à l'utilisateur les propriétés que le système doit présenter pour répondre à son besoin, et les conditions qu'il convient de vérifier.

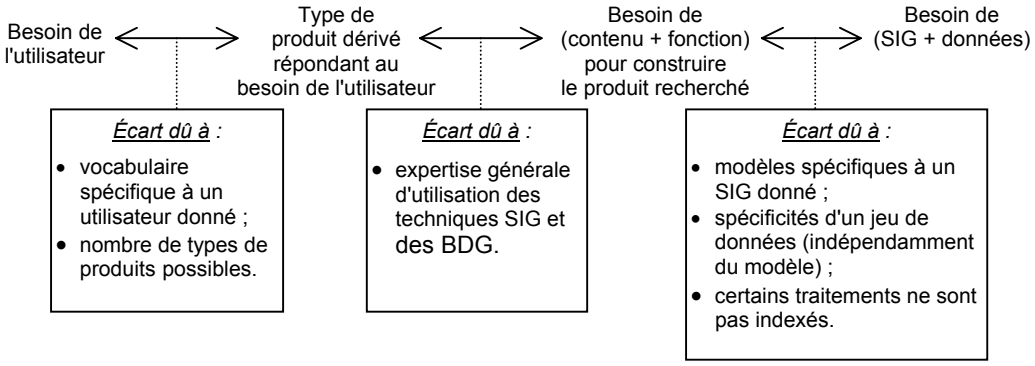


figure B.4.1 *: facteurs contribuant à l'écart entre l'expression d'un besoin d'information géographique et l'expression d'une sélection de données et traitements utiles pour y répondre.*

L'information géographique dont a besoin un utilisateur est rarement explicitement représentée dans une BDG. C'est une information qu'il faut dériver des données géographiques. C'est pourquoi notre démarche se situe en amont des SIG. Les SIG permettent de dériver de l'information mais ils ne développent pas de fonctionnalité d'aide à l'accès à cette dérivation, dans la mesure où les produits potentiellement dérivés ne sont pas « indexés » au niveau du SIG.

L'expression du besoin renvoie souvent à des concepts utilisateurs, c'est-à-dire au contexte du besoin et non aux ressources utiles pour y répondre. Or, les utilisateurs ont leurs propres représentations de l'espace géographique, qui est rarement celle utilisée par le producteur de données et qui intègrent parfois des expertises spécifiques comme celle du transport ou de l'agriculture. Ils expriment leurs besoins avec des termes spécifiques.

Cette information recherchée correspond finalement à un produit dérivé. Il existe plusieurs produits dérivés des données géographiques, comme des bases utilisateurs géo-référencées, des cartes, des tableaux de mesures résultant d'analyses spatiales et thématiques.

Certains utilisateurs non familiarisés avec l'exploitation de BDG peuvent ne pas savoir traduire leur besoin d'information géographique en un besoin de produit dérivé, c'est-à-dire qu'ils ne savent pas quel type d'application peut les satisfaire. Un besoin de produit dérivé se traduit, non seulement ,en une sélection de données, mais aussi en une sélection d'outils qui fournissent des traitements sur les données. Ces deux types de sélections ne peuvent se faire de façon indépendante. Aussi, les problèmes d'accès aux données sont multipliés par les problèmes d'accès aux capacités de dérivation des SIG. Les utilisateurs ne sont en effet pas toujours familiarisés avec ces capacités.

Lorsque le besoin est traduit en un besoin de contenu et fonctions, un problème extrêmement complexe demeure : choisir le format de données et le SIG les mieux adaptés pour répondre à ce besoin. Ce choix implique des compromis, des tests sur des jeux de données véritables. Le choix d'un SIG est un problème extrêmement complexe. Ce problème n'est actuellement pas encore optimisé au cas par cas et nous ne pouvons envisager de proposer un système générique d'aide au choix d'un SIG. Par contre, il est possible de désigner à l'utilisateur les propriétés que le système doit présenter pour répondre à son besoin, et les conditions qu'il convient de vérifier.

Aider l'accès

Les termes « accès » et « information » sont des termes extrêmement génériques. Pour étudier la problématique de l'accès à l'information géographique et définir une contribution, nous avons proposé une formalisation de la notion d'aide à l'accès [BUCHER 01]. En particulier, nous distinguons deux types d'aides : l'aide à l'accès aux informations et l'aide à l'accès aux connaissances.

Aider l'accès aux informations

Il existe des démarches, que nous appelons « services d'aide à l'accès aux informations », qui permettent à un utilisateur d'accéder à des ressources en fonction de leur contenu en information. Ces démarches permettent à l'utilisateur d'exprimer son besoin en des termes qui renvoient au contenu des ressources et non à leur format. Cela s'appuie sur une description du contenu des ressources. Cette description prend généralement la forme de méta-données. Un modèle de méta-données doit effectivement ne pas dépendre du format physique de la ressource mais plutôt du type d'information contenue dans la ressource : texte littéraire, données vecteur géographiques, ressource Web, code orienté-objet. Soulignons que la constitution de standards de méta-données géographiques fait l'objet de nombreux travaux.

Ces méta-données ont longtemps été plus orientées vers la description d'un lot de données transféré que vers le catalogage de BDG. Les informations décrites dans les méta-données et exploitées dans l'aide à l'accès sont essentiellement ce qui concerne la référence spatiale : la couverture de la base, l'échelle ou la résolution, le système de coordonnées, les positionnements possibles. Par contre, les méta-données comportent rarement des descriptions du sens des données [HEDORFER, BIANCHIN 98].

L'aide à l'accès aux informations décrite ci-dessus est souvent enrichie de la façon suivante. L'utilisation de corpus linguistiques, comme une base de synonymes ou dictionnaire de traduction d'une langue dans une autre, permet à l'utilisateur d'exprimer une requête en utilisant des mots qui lui sont plus familiers que ceux utilisés pour décrire les ressources, à condition qu'il utilise les concepts de cette description. Cela est particulièrement important dans le domaine de l'information géographique où le langage des méta-données géographiques n'est pas toujours accessible à un utilisateur.

L'utilisateur peut ne pas savoir désigner la zone qui l'intéresse en donnant ses limites dans le système Lambert II. Une aide consiste à lui permettre de désigner cette zone d'intérêt par une entité administrative. De même il peut ne pas savoir donner la valeur de la résolution qui l'intéresse et une aide consiste alors à lui permettre de désigner cette résolution par les objets typiques qu'il veut pouvoir distinguer.

Aider l'accès aux connaissances

D'autres démarches, que nous appelons « services d'aide à l'accès aux connaissances », permettent que des ressources s'intègrent dans un raisonnement mené par l'utilisateur. Une aide à l'accès à des connaissances peut se faire en favorisant divers types de raisonnements sur des ressources. Par exemple les métaphores permettent à un utilisateur de *raisonner par analogie* sur les ressources. Les classifications thématiques permettent à un utilisateur d'effectuer un *raisonnement par abstraction et généralisation*. La visualisation repose sur l*e raisonnement géométrique*.

Le raisonnement le mieux maîtrisé en Intelligence Artificielle est le *raisonnement formel*. Ce raisonnement repose sur des structures symboliques et des manipulations de ces structures, c'est-à-dire des modèles permettant de décrire une réalité et de manipuler cette description. La description fournie par ces structures peut se situer à plusieurs niveaux : celui des ressources mêmes ou celui des besoins des utilisateurs. La manipulation de ces structures permet de déterminer l'information que l'utilisateur pourrait obtenir à partir des ressources, en réponse à ses besoins. L'utilisateur peut effectuer cette manipulation seul ou aidé de composants informatiques.

L'aide au raisonnement formel est finalement complémentaire de l'aide à l'accès aux informations décrite ci-dessus. L'aide à l'accès aux informations consiste, en effet, à construire et instancier un modèle décrivant les ressources. L'aide à l'accès aux connaissances ajoute à un tel modèle des éléments décrivant les besoins d'utilisateurs, et des éléments manipulant ces descriptions.

Nous nous focalisons dans notre approche sur l'aide à l'accès aux connaissances et plus précisément sur l'aide au raisonnement formel sur les ressources. En effet, comme nous l'avons exposé dans la section précédente, notre problématique est celle de l'accès à la manipulation de données et des traitements associés à ces données. C'est donc une problématique d'accès à des briques de raisonnement formel.

Notre approche

Les principes

Modéliser de nouvelles catégories de connaissances : le *quoi* et le *comment*

En acquisition des connaissances, domaine de l'Intelligence Artificielle dédié à l'aide au raisonnement formel, un paradigme qui a longtemps présidé à la formalisation de connaissances est la séparation entre des connaissances déclaratives spécifiques à un domaine et des connaissances procédurales indépendantes du domaine. Ce paradigme a montré ses limites. Il n'est pas possible de modéliser tous les raisonnements en distinguant des connaissances déclaratives spécifiques au domaine et des connaissances procédurales universelles. En effet, les connaissances d'un domaine ne se limitent pas à des connaissances déclaratives.

Ce paradigme déchu a cédé la place à un nouveau paradigme qui est de distinguer deux nouvelles catégories de connaissances [LE ROUX 94] [CHANDRASEKARAN et al 98] :

- le *QUOI* la description d'un domaine d'intérêt ;
- et le *COMMENT*, la description de la manipulation du *quoi* pour produire de nouvelles connaissances venant enrichir ce *quoi*. Les connaissances de type *COMMENT* sont globalement les connaissances permettant de répondre aux trois questions suivantes : Pourquoi (quel est l'objectif poursuivi dans la manipulation) ? Comment (quelles sont les stratégies et les méthodes pour manipuler les objets) ? Avec quoi (quels sont les outils utilisés) ?

Actuellement, la meilleure stratégie pour formaliser efficacement des connaissances de raisonnement est d'associer ces deux catégories de connaissances, *QUOI* et *COMMENT* [GOMEZ, BENJAMINS 99].

Éléments de modélisation : les notions de rôles et de tâches

Une notion essentielle dans la modélisation axée sur le *comment* est celle de rôle telle qu'elle est utilisée dans [MARCUS 88]. Il s'agit d'attribuer aux éléments modélisés dans un domaine d'intérêt un rôle dans la résolution de problèmes portant sur ce domaine, par exemple : un critère de classification, une hypothèse. Il est possible de faire une analogie avec le monde du théâtre. Les ressources sont les comédiens, les rôles sont les personnages joués par les comédiens.

Une notion complémentaire des rôles est celle de tâche. Une tâche consiste à déterminer des connaissances « de sortie » à partir de connaissances « d'entrée ». Une tâche ne décrit pas un problème particulier mais plutôt une famille de problèmes, par exemple : la famille des calculs de trajets en métro. Les rôles sont alors le vocabulaire de base des tâches, ce sont des variables qui peuvent prendre différentes ressources comme valeurs. La résolution d'un problème particulier est obtenue à partir de la description d'une tâche en choisissant pour les rôles de la tâche des valeurs spécifiques. Pour poursuivre notre analogie avec le monde du théâtre, les tâches, c'est-à-dire les « exploitations possibles » des ressources, sont les pièces de théâtre. Pour réaliser une pièce particulière, il faut attribuer une valeur à chaque rôle apparaissant dans l'écriture générique de la pièce, c'est-à-dire un comédien spécifique qui va jouer ce personnage.

En définitive, modéliser des rôles revient à faire la distinction entre la nature d'un objet et la fonction de cet objet lorsqu'il est manipulé, comme faire la distinction entre l'identité d'un comédien et le personnage qu'il joue dans la pièce courante. Cela est particulièrement pertinent dans le contexte de l'information géographique. L'information géographique renvoie à une même réalité mais est aussi un outil destiné à de multiples utilisations, à divers raisonnements. Pour chaque raisonnement, il existe une structuration privilégiée de cette information, c'est-à-dire un ensemble de rôles privilégiés.

Application à l'aide à l'accès

Dans notre contexte, fournir une description de ressources en termes de *QUOI* consiste à *aider l'accès aux informations* contenues dans ces ressources. Associer à cette description des éléments renvoyant au *COMMENT* consiste à *aider l'accès aux connaissances* contenues dans ces ressources. En effet, les utilisateurs expriment un besoin d'exploitation de ressources, i.e. « pourquoi ? ». Le modèle permet de répondre aux questions associées « comment ? » et « avec quoi ? ». Les réponses aux « avec quoi ? » désignent justement la sélection de ressources utiles correspondant au besoin initialement exprimé.

Dans cette optique, les environnements de résolution coopérative de problèmes sont indissociables de ces modèles car ils servent d'interface entre l'utilisateur et le modèle. Les modèles eux-mêmes sont généralement trop complexes pour être directement manipulés par des utilisateurs. De tels systèmes aident un utilisateur à manipuler de tels modèles pour résoudre son problème particulier en s'appuyant sur la résolution de problèmes similaires, comme schématisé sur la figure B.4.2.

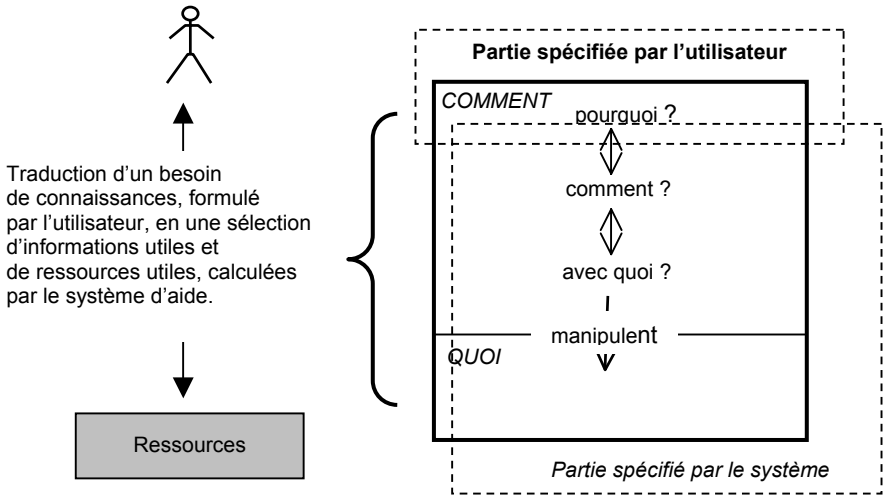


figure B.4.2

Contribution d'un modèle intégrant des connaissances
de type QUOI et COMMENT à l'accès d'utilisateurs à des ressources en information.

Par exemple, le projet Atelier Logiciel, [FICET 99], s'appuie sur un modèle à base de tâches pour permettre à des utilisateurs, non experts en traitement d'image, d'accéder à l'exploitation de ressources en traitements d'image. Les ressources, appelées *outils*, sont des bouts de codes de traitement d'image qui peuvent être paramétrés et assemblés pour constituer un programme complet de traitement d'image. Les utilisateurs des ressources, auxquels ce système est destiné, sont des experts de divers domaines (médical, industriel) travaillant sur des images.

Le système utilise un modèle comportant un *QUOI* du domaine général de l'image - avec des éléments comme « pixels », « objets brillants », « frange » - et un *COMMENT* de ce domaine. Le *COMMENT* est organisé en *tâches* - par exemple « détecter les petits objets brillants sur l'image » -, et en *méthodes* qui décomposent les tâches en *outils.* L'expression du besoin d'un utilisateur s'appuie sur la spécification d'une tâche parmi celles du modèle. L'activation de la méthode de la tâche conduit à la construction d'un module de traitement - la décomposition en outils paramétrés- répondant au besoin spécifié par l'utilisateur.

L'application des principes exposés ci-dessus au cas où les ressources sont des BDG nous permet de définir notre approche de la façon suivante. Nous devons d'une part construire un modèle du *COMMENT* associé aux BDG. Cela implique en particulier de modéliser des notions spécifiques comme les tâches et les rôles figurant dans ce *COMMENT*. Nous devons d'autre part construire un environnement de résolution coopérative de problème associé à ce modèle. Le chapitre « Notre approche », page précédente, présente notre modèle et le chapitre « Un environnement de résolution coopérative de problèmes », page 70, présente le système dédié à l'aide à l'accès associé à ce modèle.

Notre modèle de tâches géographiques

Catégories de connaissances concernées par notre modèle

Le modèle que nous voulons définir doit décrire des connaissances extrêmement variées. Nous reprenons les catégories de connaissances distinguées précédemment pour préciser quelles connaissances géographiques doivent être modélisées dans ces catégories, comme représenté figure B.4.3, page suivante. Par la même occasion, nous évaluons l'état actuel de formalisation de ces connaissances.

La catégorie « pourquoi manipuler des données géographiques ? » correspond à l'énoncé d'objectifs d'application SIG. Leur formalisation peut reposer sur des modèles de l'information géographique appréhendée par les hommes, que nous appelons le *QUOI* géographique des hommes. Certains de ces modèles sont partagées par tous les hommes. Il s'agit des lois de la physique, de certaines conventions sociales, et des connaissances géographiques de sens commun que certains auteurs cherchent à formaliser sous le terme de « géographie naïve » [EGENHOFER, MARK 95]. D'autres modèles sont dédiés à des activités, comme l'aménagement du territoire, l'environnement, le géomarketing. Il n'existe pas de description formelle de l'information géographique adaptée à tous les hommes et à leurs activités [RAPER 96].

La catégorie « comment ? » renvoie à des stratégies et méthodes d'utilisation de données, comme la modélisation des données, le choix de la représentation, la structuration du travail en processus effectués par des composants logiciels. Il n'existe pas de formalismes supportant toutes ces étapes, hormis quelques démarches très focalisées sur un outil ou un type d'application comme celle de [MITCHELL 99]. De plus, de telles les démarches sont peu formalisées. Elles cherchent à expliquer à des utilisateurs une expertise de manipulation de données géographiques et la conception d'applications SIG.

Dans ce contexte, les auteurs ne recherchent pas la formalisation car elle est souvent perçue comme un obstacle à la compréhension. Ils préfèrent proposer une énumération de termes commentés en langage naturel qu'un modèle structuré.

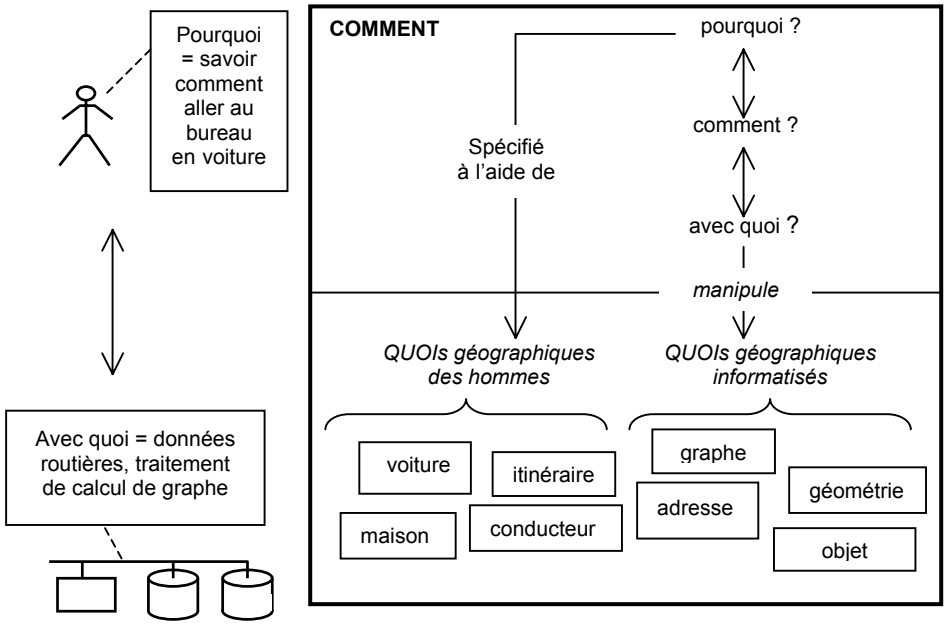


figure B.4.3

Liens entre les catégories de connaissances du COMMENT
et celles du QUOI, dans le cadre de l'exploitation de données géographiques.

La catégorie « avec quoi ? » renvoie aux outils de manipulation des données géographiques. Ces outils peuvent être des traitements de requêtes spécifiquement géographiques [BOURSIER, MAINGUENAUD 92], des fonctions d'analyse spatiale ou de cartographie [MAGUIRE, DANGERMOND 91] [ALBRECHT 96], ou de services de haut niveau identifiés dans les démarches de normalisation et interopérabilité [OGC 98]. Des formalisations sont proposées pour décrire de façon générique ces outils, c'est-à-dire de façon indépendante de leur format.

La catégorie du *QUOI* renvoie aux démarches visant à améliorer les représentations de l'information géographique dans les bases de données ou dans les méta-données. Chaque démarche s'attache à une difficulté particulière. Citons, entre autres : la représentation du spatio-temporel [CLARAMUNT et al 94], la représentation du 3-D, la prise en compte de l'incertitude de résolution et de discrétisation [GOODCHILD, JEANSOULIN 98], la représentation de la double nature continue/discontinue de l'information géographique [LAURINI, GORDILLO00], l'intégration d'éléments de la cognition dans la représentation [MENNIS et al 00], la représentation cohérente des différentes résolutions significatives de l'information géographique [SPACCAPIETRA et al 99]. Il existe également des formalisations dédiées à des applications.

Ces applications peuvent être caractérisées par un domaine spécifique, comme le transport, un produit spécifique, comme la généralisation cartographique [RUAS 99], un raisonnement spécifique comme l'analyse spatiale et le data mining.

En conclusion de cette section, nous retenons deux principaux points :

- certaines catégories de connaissances sont modélisées et d'autres ne le sont pas. Les connaissances peu formalisées se situent essentiellement dans les catégories du *COMMENT* ;
- une formalisation globale du *COMMENT* devrait comporter non seulement les opérations sur les données géographiques, mais encore les méthodes d'utilisation de ces opérations pour construire des applications, et également les questions surgissant dans des domaines d'activité et nécessitant la construction d'application.

Par ailleurs, les catégories modélisées sont encore peu reliées les unes aux autres.

Grandes lignes de notre modèle

Pour contribuer à l'accès d'utilisateurs à l'information géographique, nous voulons proposer un modèle dont la nouveauté est d'expliciter les différentes catégories de connaissances de type *QUOI* et *COMMENT* (*pourquoi, comment, avec quoi)*, et les liens entre ces catégories. Pour cela, ce modèle intègre les notions de tâches, méthodes, rôles et domaine, telles qu'elles sont introduites dans [SCHREIBER et al 99].

Les tâches

Rappelons qu'une tâche ne correspond pas à un problème particulier résolu (comme : aller en métro le 6 mars 2000 à 15 heures, de la place de la Bastille à la Place de Clichy, à Paris) mais plutôt à un problème générique, soit encore une famille de problèmes particuliers (comme aller d'un endroit de Paris à un autre en métro). La description d'une tâche peut être spécifiée pour décrire comment résoudre les problèmes particuliers appartenant à la famille de problèmes décrite dans la tâche. La première composante d'une tâche est la description du problème générique posé. Elle consiste en des entrées et sortie qui sont des rôles c'est-à-dire des variables renvoyant à des ensemble de valeurs possibles dans le domaine. La deuxième composante d'une tâche est la description de la résolution du problème générique. Cette description varie selon que la tâche est dite primitive ou complexe. Une tâche est primitive lorsque tous les problèmes particuliers décrits par la tâche sont résolus de la même façon (par un mécanisme figé), du moins au niveau de détail du modèle. Il s'agit, par exemple, des opérations SIG.

Une tâche est complexe lorsque sa résolution dépend du contexte, c'est-à-dire qu'elle varie selon le problème particulier décrit par la tâche. C'est le cas par exemple de la tâche de localisation, ou de calcul d'itinéraire. La résolution de chaque problème particulier n'est pas explicitement représentée dans le modèle mais doit pouvoir être retrouvée sous la forme d'un plan d'exécution (c'est-à-dire une structure de sous-tâches primitives). Les connaissances de résolution explicitement représentées dans le modèle sont la description de la résolution du problème générique, un plan générique non détaillé (c'est-à-dire qui peut comporter des sous tâches complexes et des choix), et des règles de spécification permettant d'en dériver les plans d'exécution des problèmes particuliers. Notons qu'une tâche complexe est associée finalement à deux types de résultats. La sortie de la tâche (le résultat attendu) et la sortie produite par le plan d'exécution. Ces sorties ne sont pas identiques. Le résultat attendu renvoie au besoin d'un utilisateur et la sortie du plan détaillé renvoie à un résultat d'application, qui est une forme de réponse au résultat attendu.

Les rôles

Les rôles sont le vocabulaire spécifique aux tâches, par exemple, pour le calcul d'itinéraire, « point de départ », « point d'arrivée », « dessertes », « temps de parcours », « véhicule », « graphe ». Un rôle est décrit par un nom et par l'ensemble de ses valeurs possibles dans le domaine, que nous appelons ses candidats. Les connaissances précisant les candidats des rôles sont un élément essentiel de notre système. Dans l'exemple du calcul d'itinéraire, si le véhicule est un convoi militaire spécial, il est nécessaire de déterminer quels objets des BDG vont remplir le rôle d'arête du graphe. Il s'agit des entités sur lesquelles ce véhicule peut rouler c'est-à-dire les tronçons routiers et les ponts tels que la chaussée à une certaine largeur et peut supporter un certain poids.

Le domaine

Le domaine géographique comporte les objets manipulés dans les tâches et inférences. Certains éléments du domaine décrivent bien sûr les ressources, c'est-à-dire les lots de données disponibles. D'autres éléments permettent d'énoncer l'objectif d'une tâche et de le spécifier, comme une ville, une navigation, une cartographie. Ces concepts ne sont pas toujours représentés dans les données mais sont nécessaires au raisonnement de l'utilisateur. Soulignons que dans la description courante d'une tâche, un même mot, comme « système de référence » renvoie souvent soit à un élément du domaine, soit à un rôle. Par exemple : le mot « système de référence » dans la tâche de localisation est un rôle dont les valeurs possibles sont non seulement les systèmes de références décrits dans le domaine (systèmes directs, des systèmes linéaires, des systèmes d'adresses postales, systèmes administratifs, etc), mais aussi une cartographie, ou une navigation, c'est-à-dire ce qui peut jouer le rôle d'un système de référence dans une tâche de localisation.

Grammaire BNF

Nous proposons un langage permettant de décrire sans ambiguïtés les connaissances importantes de notre modèle. Nous ne voulons pas décrire des tâches de façon exhaustive mais expliciter des connaissances suffisantes et les structurer de façon à ce qu'elles soient exploitables dans notre contexte. Cette exploitation ne consiste pas à réaliser ces tâches mais à déterminer la tâche représentant le mieux le besoin de l'utilisateur et la réponse à ce besoin. Cette grammaire est reprise sur la figure B.4.4, page suivante. Nous détaillons certaines définitions, les autres découlent naturellement des grandes lignes de notre modèle présentées précédemment.

Une tâche *spécifiée* est ainsi une tâche dans un certain état de spécification. Elle est décrite par le nom de la tâche générique, et par les rôles spécifiés, c'est-à-dire les rôles génériques associés aux ensembles de valeurs spécifiés. Soulignons que la description d'une tâche complexe générique n'explicite pas nécessairement tous les rôles de cette tâche. Certains rôles, dont on ne peut définir de façon générique les candidats *a priori*, ne sont décrits qu'à partir du moment où ils sont spécifiés.

Un *ensemble* peut être défini par un nom, par une intension, par une extension, ou comme l'union de deux ensembles. Il peut aussi être défini comme les valeurs d'une propriété d'un élément. Une définition intensive d'un ensemble consiste à donner des conditions d'appartenance à cet ensemble. Elle s'appuie sur un ou plusieurs éléments génériques du domaine, par exemple : Int(entité) s'appuie sur l'élément du domaine entité pour désigner l'ensemble de tous les éléments du domaine qui sont des entités. Une définition extensive d'un ensemble consiste à énumérer ses éléments.

Une *méthode* est définie par sa description éventuelle en langage naturelle, des règles éventuelles de proposition de spécification, des règles éventuelles de propagation de spécification, des règles éventuelles de stratégie, c'est-à-dire de modification du plan, un plan non détaillé qui est une structure de tâches.

Une *structure de tâche* est une structure classique telle que celles utilisées dans les langages procéduraux. Les procédures élémentaires sont ici des tâches spécifiées. Une structure de tâche possède de plus éventuellement un vocabulaire. Le vocabulaire d'une structure sert à désigner des rôles importants des tâches composant cette structure. Un terme du vocabulaire est défini par un nom et un pointeur vers des rôles. Un pointeur vers des rôles peut être de deux types. Ce peut être un pointeur direct vers des rôles appartenant à des sous-tâches de la structure. Ce peut être un pointeur indirect qui désigne non pas des rôles mais des termes parmi les vocabulaires des sous-structures. Les règles de proposition ou de propagation de spécification sont des *règles de spécification* définies par une spécification de rôle (prémisse) qui implique une ou plusieurs spécifications de rôles (conclusion).

Les *règles de stratégie* sont définies par une spécification de rôle (prémisse) qui implique une action sur le plan (conclusion). Une *action sur le plan* consiste à remplacer une structure par une autre c'est-à-dire généralement résoudre un choix, par exemple : remplacer une structure du type « OU(structure1, structure2, structure3,..) » par « structure 1 ». La section suivante présente les principes de l'exploitation d'une base de connaissances structurée selon ce langage.

Vocabulaire terminal : Nom : chaîne de caractère identifiant une tâche, un rôle, un ensemble, un élément du domaine ; Description : texte en langage naturel ; Nombre : un entier positif ou « n »; ChoixUtilisateur : valeur booléenne

<Tâche>::=: <Tâche Complexe> |<Tâche Primitive>
<Tâche Complexe>::=: **TC** Nom [**(**Description**)**]
sortie : <Rôle>
[**entrée :** <Rôle> {**;**<Rôle>}]

[**sortie secondaire :** <Rôle>{**;**<Rôle>}]
méthode : <Méthode>
<Tâche Primitive>::=: <Tâche Primitive Détaillée>**| TP(**Description**)**
<Tâche Primitive Détaillée>::=: **TP** Nom [**(**<Description>**)**]
sortie : <Rôle>
[**entrée :** <Rôle> {**;**<Rôle>}]

[**sortie secondaire :** <Rôle>{**;**<Rôle>}]
mécanisme : <Mécanisme>
< Tâche spécifiée >::=:Nom{/<Rôle> = <Ensemble>|<PointeurRôle>}
<Mécanisme> ::=: Nom
<Rôle>::=: Nom [**(**<Ensemble>**)**]
<Ensemble>::=: **Ens** Nom | **Int(**<Elt du Domaine>[{;<Elt du Domaine>}]**)** |**Ext(**<Elt du Domaine>[{;<Elt du Domaine>}]**)** |<Ensemble>**+**<Ensemble> | <Intervalle>**uplet de** <Ensemble> | **"**Nom**" de** <Elt du Domaine>
<Intervalle>::=: Nombre[**..** Nombre]
<Elt du Domaine>::=: Nom [**(propriétés :** <Propriété>{;<Propiété>}**)**]|**Elt.(**<Ensemble>**)**|**Elt.(**<Role>**)**
<Propriété>::=:**"**Nom**"** <Ensemble>
<Méthode> ::= [Description]
[**Propos spécif** : <RèglesSpecif>[{; <RèglesSpecif>}]]
[**Propag spécif** : <RèglesSpecif>[{; <RèglesSpecif>}]]
[**Stratégie**: <RèglesStratégie>[{;<RèglesStratégie>}]]
[**Plan non détaillé** : <Structure de tâches>]
<Structure de tâches >::=:
[**Vocabulaire** : Nom[**(**<PointeurRôle>**)**][{**,**Nom[**(**<PointeurRôle>**)**]}]]
[<Tâche spécifiée> |**ET(**<Structure de tâches >[{**;**<Structure de tâches >}]**)** |**OU(**<Structure de tâches >[{**;**<Structure de tâches >}]**)** |**TANT QUE (**<Expression booléenne>**) REPETE (**<Structure de tâches >**)**
|**SI** <Expression booléenne> **ALORS** <Structure de tâches > **SINON** <Structure de tâches > **FINSI**]
[{<Structure de tâches>}]
<Expression booléenne>::=: <Exp bool simple>|<Exp bool simple>**^**<Exp bool simple>|<Exp bool simple>v<Exp bool simple>
<Exp bool simple>::=: <TestRole>|ChoixUtilisateur
<TestRole>::=:Nom<SpécificationEnsemble>
<PointeurRôle>::=: Nom [**dans** <Tâche> | **dans** <Structure de tâche>]
<RèglesSpecif>::=: <SpecificationRole>→<SpecificationRole>[{**,**<SpecificationRole>}]
<RèglesStratégie>::=: <SpecificationRole>→ <ActionPlan>[{**,**<ActionPlan>}]
<SpecificationRole>::=: **Spécification de** Nom [**(**<SpécificationEnsemble>**)**]
< SpécificationEnsemble>::=: <Préfixe><Ensemble>
<Préfixe>::=: **=|≠|+=|-=|⊃|⊂|⊄**
<ActionPlan>::=:<Structure>→<Structure>

figure B.4.4
Définition du vocabulaire et de la grammaire de notre langage de description de tâches, à l'aide du langage Extended Backus-Naur Forms.

Un environnement de résolution coopérative de problèmes

Une deuxième composante de notre approche, complémentaire du modèle et du langage présentés ci-avant, est un environnement de résolution coopérative de problèmes qui doit exploiter le modèle de tâches géographiques pour aider un utilisateur à concevoir une utilisation de données géographiques répondant à son besoin.

L'exploitation du modèle par le système ne consiste pas à réaliser une tâche géographique modélisée mais à spécifier une tâche géographique telle que sa facette déclarative représente le besoin de l'utilisateur et son plan détaillé représente la réponse à ce besoin. Ce processus de spécification est la détermination d'une tâche complexe. Il consiste à construire un plan d'exécution de cette tâche, à partir de son plan détaillé, en itérant deux processus : remplacer les tâches complexes par leur plan non détaillé jusqu'à ce qu'il ne reste plus de tâche complexe, et éliminer les choix apparaissant éventuellement dans les plans non détaillés participant à cette décomposition, figure B.4.5, ci-dessous.

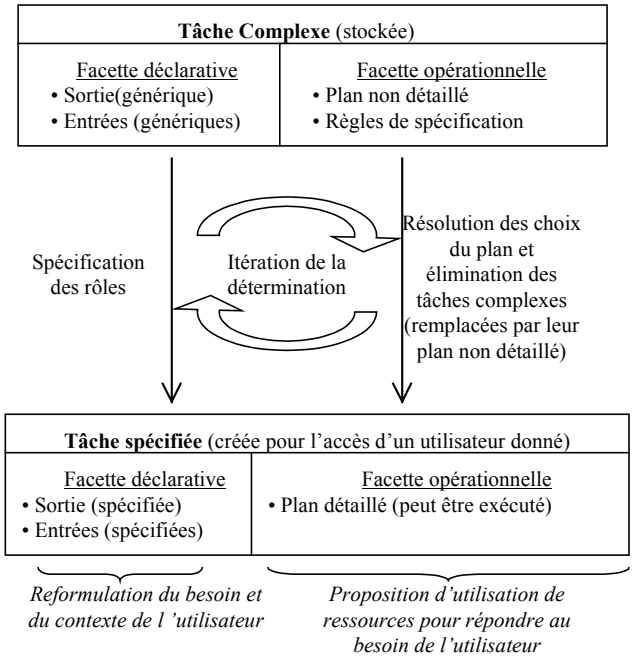


***figure B.4.5** : processus de détermination d'une tâche complexe conduisant à une tâche représentant le besoin de l'utilisateur et une réponse à ce besoin.*

Le fonctionnement du système sur ce principe est décrit figure B.4.6, ci-dessous. Un prototype de ce système a été implémenté en orienté-objet. Une attention particulière a été apportée à la définition de structures et de connaissances procédurales génériques. La description d'une tâche géographique particulière s'appuie uniquement sur la spécification de variables et non sur l'écriture de connaissances procédurales.

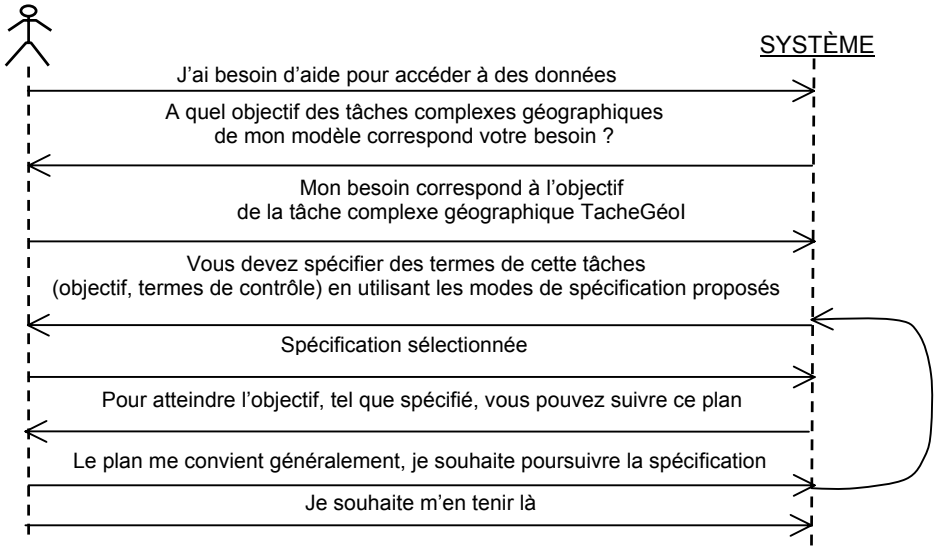


***figure B.4.6** : scénario général de reconnaissance de ressources*

Un exemple : la tâche de localisation

Ce modèle est utilisé pour décrire des tâches géographiques. En particulier nous décrivons la tâche de localisation. C'est une tâche extrêmement générale pour laquelle il n'existe pas de méthode générique. Le terme « localisation » renvoie à une variété de besoins et d'outils utilisés pour répondre à ces besoins. Notre modèle permet de construire un modèle générique de cette tâche qui se spécifie pour couvrir une diversité de cas.

Nous proposons de résumer la tâche de localisation en considérant que cette tâche consiste à produire une référence spatiale telle que cette référence soit effectivement associée à l'entité que veut localiser l'utilisateur, et telle que cette référence soit définie dans un système pertinent pour le besoin de l'utilisateur. Cela permet de définir une méthode générique comportant deux étapes :

- la première étape est de produire une référence spatiale effectivement associée à cette entité, obtenue le plus simplement possible, et exploitable par un SIG. Elle est appelée « référence intermédiaire ». Notons que si l'utilisateur possède déjà une référence spatiale de l'entité qu'il veut localiser, cette première étape est inutile. Cette étape se décompose elle-même en deux sous-tâches : acquérir un système de référence et produire une référence spatiale dans ce système ;
- la deuxième étape est de produire une nouvelle référence spatiale, à partir de celle produite dans la première étape, en se plaçant dans un système de référence pertinent pour l'utilisateur. Notons que si la référence produite dans la première étape est exploitable par l'utilisateur alors cette deuxième étape est inutile. Cette référence est désignée par le rôle « référence souhaitée ». Cette étape se décompose elle-même selon les mêmes sous-tâches que l'étape précédente.

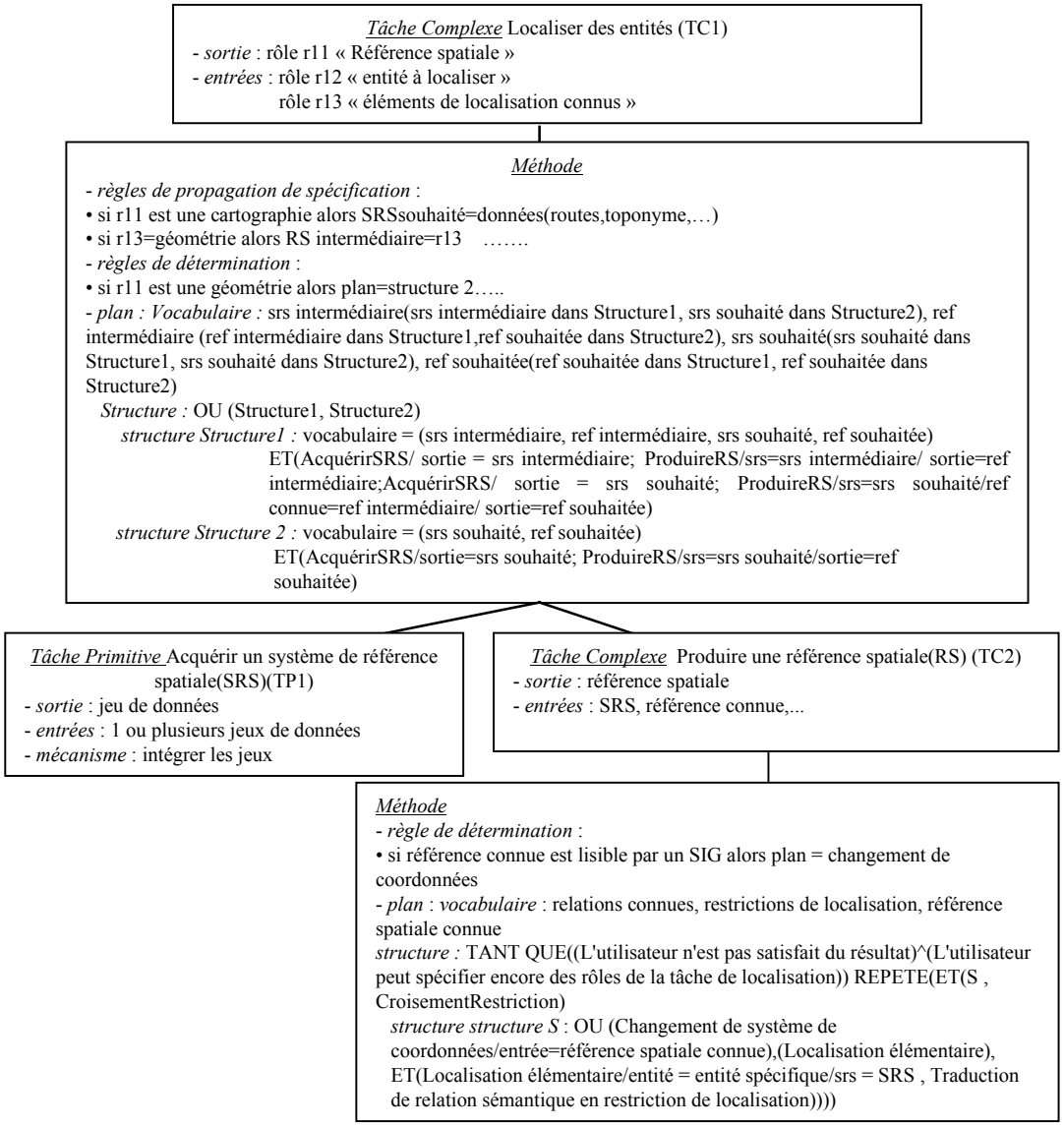


figure B.4.7

Modélisation de la tâche de localisation à l'aide de notre modèle (tous les éléments n'ont pu être repris sur cette figure).

Un point important est de définir les candidats des divers rôles sur le domaine. Par exemple, le rôle « référence spatiale » qui représente l'objectif de la tâche de localisation a pour candidats les éléments suivants : une géométrie, une référence linéaire, une carte de situation, des indications de navigation.

Ce modèle est implémenté dans un prototype en java. Ce système permet à l'utilisateur de spécifier la tâche de localisation pour décrire son problème particulier. Cela se fait grâce à une interface présentant les rôles de la tâche et les éléments de spécification de ces rôles.

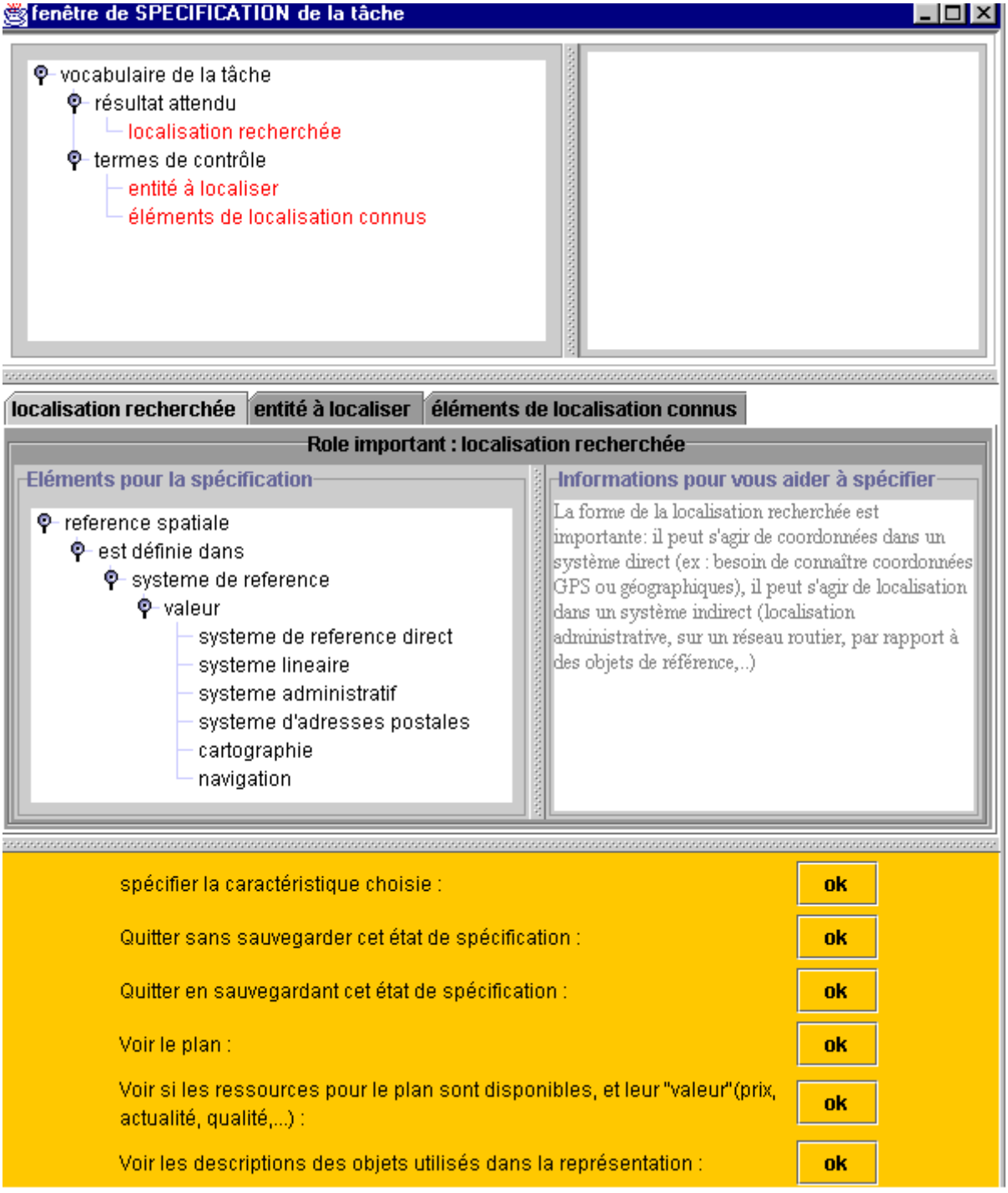


figure B.4.8 *: interface permettant à un utilisateur de spécifier la tâche représentant son besoin*

L'utilisateur peut spécifier de diverses façons les rôles de la tâche pour décrire son problème particulier. Par exemple : il peut spécifier « l'entité à localiser » des façons suivantes : sélection dans une ontologie, description de l'échelle caractéristique, spécification d'une entité qu'elle compose, spécification d'une localisation spatiale dont elle fait l'objet, spécification d'une entité avec laquelle elle a un lien. Il peut spécifier la « référence spatiale» recherchée en spécifiant le système de référence qui l'intéresse.

Conclusions et suites en cours

Nous avons présenté une contribution dont le principe est de décrire des gabarits d'utilisations de données géographiques et de permettre à un utilisateur de savoir comment répondre à son besoin d'information géographique en adaptant ces gabarits à son contexte particulier.

Les apports de ce modèle sont multiples :

- il permet de modéliser des connaissances jusqu'ici peu formalisées qui portent sur la description de besoins d'information et de méthodes de dérivation de telles informations ;
- il permet de modéliser des connaissances de spécification permettant l'expression d'un besoin particulier et sa traduction en une sélection de ressources, c'est-à-dire des catégories de connaissances intervenant précisément dans l'accès. Ces connaissances portent sur la spécification du besoin et sur la spécification de la méthode de réponse à ce besoin.

Ce modèle a été utilisé pour modéliser des raisonnements géographiques particuliers comme la localisation et la détermination de navigation. La tâche de localisation a aussi été implémentée. Le modèle et la base de connaissances associée sont exploités par un système expert pour aider un utilisateur à répondre à son besoin particulier d'information géographique en adaptant un gabarit d'utilisation de données géographiques. Ce prototype montre qu'il est possible de stocker sous forme d'objets les éléments du modèle de tâches géographiques de façon à ce qu'ils puissent être manipulés automatiquement pour construire la réponse à un besoin d'utilisateur en spécifiant une tâche géographique.

En définitive, le travail présenté dans ce rapport initie une démarche. Il apporte une vue d'ensemble sur la problématique traitée, situe une contribution originale et démontre la faisabilité de cette approche. Plusieurs aspects de ce travail demandent à être poursuivis : la modélisation des tâches de localisation et détermination de navigation et l'implémentation de ces tâches dans le prototype, la modélisation de traitements SIG comme des tâches primitives, la mise en place d'une interface utilisateur conviviale.

Références

[ALBRECHT 96] Jochen Albrecht : *Universal GIS operations for environmental modeling*, in Proceedings of the 3rd International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Barbara, Ca (USA), 1996.

[BOURSIER, MAINGUENAUD 92] Patrice Boursier and Michel Mainguenaud : *Spatial Query Languages : extended SQL vs visual languages vs hypermaps*, in Proceedings of the 5th International Conference on Spatial data Handling, SDH'92, Charleston (USA), pp. 249-259, 1992.

[CHANDRASEKARAN et al 98] B. Chandrasekaran, J.R. Josephson and V. Richard Benjamins : *The Ontology of Tasks and Methods,* Knowledge Acquisition Workshop, KAW'98, 1998

[CLARAMUNT et al 94] Christophe Claramunt, Marie-Hélène de Sède, Roland Prélaz-Droux & Laura Vidale : *Sémantique et Logique Spatio-temporelles,* in Revue Internationale de Géomatique, vol. 4, n° 2, pp. 165-180, 1994.

[EGENHOFER, MARK 95] Max Egenhofer and David Mark : Naive Geography, Andrew U. Frank, Werner Kuhn (Eds.): Spatial Information Theory : *A Theoretical Basis for GIS,* International Conference COSIT '95, Semmering (Austria), September 1995, in Proceedings, Lecture Notes in Computer Science, vol. 988, Springer, pp. 1-15, 1995.

[FICET 99] Valérie Ficet Cauchard : *Réalisation d'un Système d'Aide à la Conception d'Applications de Traitements d'Images : une Approche Basée sur le Raisonnement à Partir de Cas,* thèse de doctorat de l'Université de Caen, spécialité : informatique, 1999.

[GÓMEZ, BENJAMINS 99] Asuncion Gómez and Richard Benjamins : *Overview of Knwoledge Sharing and Reuse Components : Ontologies and Problem-Solving Methods,* in Proceedings of the IJCAI-99 workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods (KRR5) Stockholm, Sweden, August 2, 1999 (V.R. Benjamins, B. Chandrasekaran, A. Gomez-Perez, N. Guarino, M. Uschold, eds.), pp. 1.1-1.15, Stockholm, Suède, 1999.

[GOODCHILD, JEANSOULIN 98] Michael Goodchild and Robert Jeansoulin : *Data Quality in Geographic Information*, Hermes, Paris, 1998.

[HEDORFER, BIANCHIN 98] Markus Herdorfer & Alberta Bianchin : *Un modèle Structurel pour Méta-données,* Journées Cassini, Marne-la-Vallée (F), 1998.

[LAURINI, GORDILLO 00] Robert Laurini, Sylvia Gordillo : Field Orientation for Continuous Spatio-temporal Phenomena, in *proceedings of the International Workshop on Emerging Technologies for Geo-based Applicatons*, Ascona (CH), pp. 77-101, May 22-26, 2000.

[LE ROUX 94] Bernard Le Roux : *Éléments d'une Approche Constructive de la Modélisation et de la Réutilisation en Acquisition des Connaissances,* thèse de Doctorat de l'Université de Paris IV, 1994 ;

[MAGUIRE, DANGERMOND 91] D.J. Maguire and J. Dangermond *: The functionality of GIS,* in *Geographical Information Systems : Principles and Application*, edited by D.J. Maguire, M.F. Goodchild and D. Rhind (Harlows : Longmans), vol. 1, pp. 319-335, 1991.

[MARCUS 88] Sandra Marcus : *Automating Knowledge Acquisition for Expert Systems*, Sandra Marcus (Ed.), Boston : Kluwer Academic, 1988.

[MENNIS et al 00] J.-L. Mennis, D.J. Peuquet and L. Qian : *A conceptual framework for incorporating cognitive principles into geographical database representation,* in the International Journal of Geographical Information Science, 14(6), pp. 501-520, 2000.

[MITCHELL 99] Andy Mitchell : *The ESRI Guide to GIS Analysis,* vol. 1 : Geographic patterns & relationships, USA, 1999.

[OGC 98] Open GIS Consortium Technical Committee : *The OpenGIS ® Guide Introduction to Interoperable Geoprocessing and the OpenGIS Specification,* édité par Kurt Buehler et Lance McKee, June 3, 1998.

[RAPER 96] Jonathan Raper : *Unsolved problems of spatial representation,* in Proceedings of SDH'96, 14.1-14.11, 1996.

[SCHREIBER et al 99] A.Th. Schreiber, J.M. Akkermans, A.A. Anjewierden, R. de Hoog, N.R. Shadbolt, W. Van de Velde and B.J. Wielinga : *Knowledge Engineering and Management,* The CommonKADS Methodology, The MIT Press, 1999.

[SPACCAPIETRA et al 99] S. Spaccapietra, C. Parent, E. Zimanyi and C. Vangenot : *MurMur : A Research Agenda on Multiple Representation,* in Proceedings of the International Symposium on Database Applications in Non Traditional Environments, DANTE'99, Kyoto (Japan), 1999.

Publications

[BUCHER 01] Bénédicte Bucher : *A Model to Store and Reuse Geographic Application Patterns, in GI in Europe : Integrative, Interoperable, Interactive*, in Proceedings of the 4th AGILE Conference, April 2001, Brno (Czech Republic), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-037/S-COM-BB, 2001.

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

B.5. Vers la représentation multiple : le projet MurMur

Sandrine Balley

Contexte général

Le travail présenté ici concerne l'unification de bases de données géographiques couvrant un même territoire. L'existence de plusieurs bases sur une même zone ne constitue pas un problème en soi, mais au contraire un gage de richesse de l'information disponible. En effet, chaque base représente un type particulier d'appréhension de l'espace qui permet son propre ensemble de raisonnements.

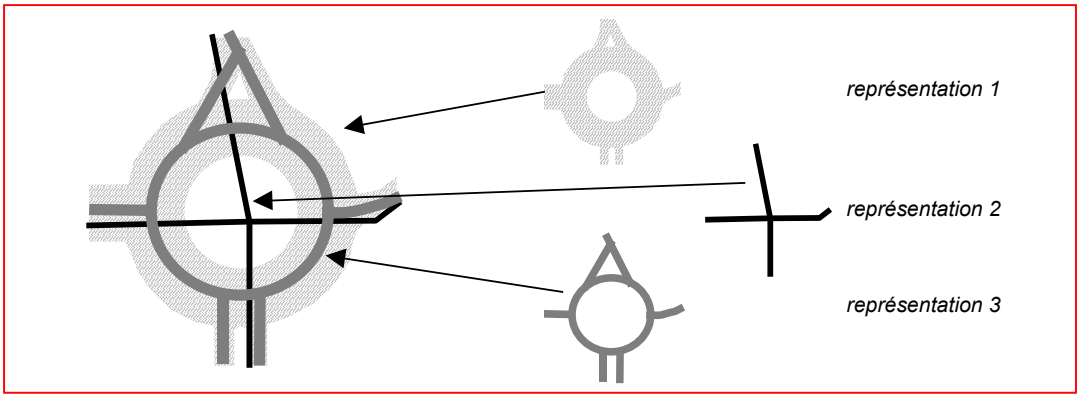


***figure B.5.1** : différentes représentations du même rond-point dans des bases de données*

- *la représentation 1* : surfacique, requiert une saisie de haute résolution et caractérise l'information topographique ;
- *la représentation 2* : simple nœud routier, suffit dans la description du réseau routier principal, elle est utilisée à petite échelle ;
- *la représentation 3 :* définit précisément les axes de circulation dans le rond-point. Elle peut être utilisée dans des applications de navigation. Ces différences ne sont pas dues à la qualité des données mais à la *représentation* adoptée dans les bases.

Par contre, le fait que ces bases de données soient conservées de façon disjointe et indépendante cause des difficultés de gestion et de mise à jour pour les producteurs et d'exploitation pour les utilisateurs.

Abordons d'abord la situation du côté de la production. À l'IGN, les trois principales bases de données vecteur que sont la BD Topo, la BD Carto et Géoroute sont produites indépendamment, de façon complémentaire mais avec des redondances. Cette situation s'explique principalement par les raisons suivantes :

- le point de vue utilisé pour la production varie selon les besoins présumés des utilisateurs : Géoroute se concentre, par exemple, sur les connexions entre lieux, alors que la BD Topo prend en compte les détails topographiques et la position précise des objets ;
- les outils de dérivation par généralisation automatique n'étaient pas assez performants à l'époque de la constitution des bases. Il a donc été nécessaire de produire séparément des données de résolutions différentes, qui auraient pu être dérivés les uns des autres si ces outils avaient été opérationnels.

Même si ces outils étaient accessibles, le délai de production d'une base de données à haute résolution sur la France entière, source de généralisation, serait rédhibitoire : il n'est pas envisageable d'attendre que la BD Topo soit complète pour pouvoir produire une carte routière à petite échelle.

Cette segmentation de l'information géographique alourdit considérablement la production et la maintenance des bases de données : une modification du territoire donne lieu à trois mises à jour indépendantes (une dans chacune des bases) et à trois contrôles de cohérence [BADARD 00]. Ces opérations seraient allégées si l'information était réunie en une base unique, conservant les différentes représentations du monde réel, tout en les rendant cohérentes. Ce besoin de cohérence touche également les utilisateurs d'information géographique.

Aucune solution générale n'est disponible pour gérer facilement plusieurs représentations du terrain, ce qui pourtant concerne de nombreuses applications géographiques :

- la cartographie numérique à représentation multiple, qui consiste à adapter la résolution de l'affichage à tout moment en fonction du besoin de l'utilisateur ;

- les analyses représentation multiple : certains utilisateurs utilisent des données disponibles uniquement dans des produits distincts, par exemple : des altitudes combinées avec des adresses en ville. Il incombe alors à l'utilisateur de mettre en correspondance une BD topographique avec une BD de rues, opération très complexe. Il serait intéressant de pouvoir accéder à ces différents jeux de données simultanément par un autre moyen ;
- le suivi des phénomènes dans le temps : il peut être essentiel de conserver pour un objet, par exemple : une parcelle cadastrale ou un lac, ses géométries et ses attributs sémantiques successifs, afin de réaliser des analyses temporelles. Afin de ne pas conserver de données redondantes, une structure particulière d'objet pourrait être créée dans une base de données accueillant toute l'information successive.

Problématique : la représentation multiple

La démarche exposée ici repose sur le concept de représentation multiple. Des précisions sont données, ci-dessous, sur les termes de représentation et de représentation multiple. Puis, les problèmes à résoudre pour accéder à la représentation multiple sont exposés.

Deux critères sont pris en compte lors de la comparaison de différentes représentations : le *point de vue* et la *résolution* [VANGENOT 01].

Le *point de vue* matérialise l'intérêt spécifique du concepteur de données qui a présidé à certains choix de contenu et de représentation, dont principalement le choix des types d'objets et de relations présents dans la base de données, le choix des propriétés intéressantes pour décrire ces types, le choix du mode de définition de ces propriétés.

La *résolution* définit le niveau de détail choisi, afin de ne retenir dans la base de données que les objets reconnus comme significatifs.

Point de vue et résolution caractérisent donc le contenu des bases de données et sa représentation numérique. Lorsqu'il s'agit de comparer, dans deux bases de données, les instances représentant un même phénomène géographique, c'est-à-dire lorsque l'on ne considère plus les bases de données mais les données, on peut utiliser, en plus, les concepts de terrain nominal et de qualité [DAVID, FASQUEL 97].

Le terrain nominal représente le monde réel vu à travers le spectre des spécifications de la base de données. Ces spécifications incluent, à la fois, le point de vue et la résolution choisis : c'est le contenu « parfait » de la base. La qualité d'une base se mesure par sa distance au terrain nominal. Deux instances d'un même phénomène géographique peuvent donc différer pour deux raisons : soit, parce que les spécifications de leurs bases, et donc leurs représentations dans les terrains nominaux sont différentes, soit, parce qu'ils ont été saisis avec des erreurs de niveaux différents.

La représentation multiple désigne la possibilité d'accéder à plusieurs représentations des phénomènes géographiques dans une seule base de données, ces différentes représentations étant liées entre elles pour bien spécifier qu'elles correspondent à une même entité du monde réel.

En tant que possibilité de gestion d'une information polymorphe mais unifiée, la représentation multiple s'impose donc comme une solution au problème d'incohérence des bases, exposé dans le contexte de cet article. Les principales spécifications de la représentation multiple se résument à :

- rendre cohérent le contenu de la base unifiée, en gérant les représentations, de façon liée ;
- garder opérationnelles les applications existantes, en permettant d'exploiter chaque représentation indépendamment des autres.

La création d'une base à représentation multiple, à partir de bases à représentation unique existantes, nécessite de traiter plusieurs problèmes, détaillés ci-dessous. Ces problèmes touchent aux deux niveaux exposés ci-dessus, pour le terme de représentation : le niveau des bases de données reposant sur le point de vue et la résolution des bases, et le niveau des instances, incluant en plus la qualité des données.

On peut citer les thèmes de recherche suivants :

- le problème de la modélisation des concepts : il s'agit de définir le schéma conceptuel (voir figure B.5.2, page 78) de la base à représentation multiple, ce qui nécessite :

  (1) de réfléchir aux concepts communs des différentes bases et au meilleur moyen de les modéliser ;
  (2) de disposer d'outils de modélisation (un langage de modélisation, un assistant de génie logiciel) supportant la représentation multiple ;
  (3) le problème du SGBD : les SGBD et SIG du marché disposent de modèles logiques (voir figure B.5.2) qui, par défaut, ne gèrent actuellement pas la représentation multiple. Une part de développement est donc nécessaire avant d'y intégrer des données à représentation multiple ;
  (4) le problème de l'appariement des données : la relation existant entre deux instances homologues de deux bases différentes doit, le plus souvent possible, pouvoir être reconnue automatiquement afin d'alléger le travail d'unification des bases existantes. Cela suppose l'utilisation d'algorithmes d'appariement les plus performants possible ;

(5) le problème du peuplement de la base de données à représentation multiple : les données existantes sont à modifier avant d'être intégrées dans la nouvelle base, dont les objets sont modélisés différemment.

- De plus, une fois ces problèmes résolus et la base créée, il faut envisager les questions de sa gestion et de son interrogation et donc :

(6) le développement d'un langage de requête prenant en charge la représentation multiple.

Contexte de recherche et objectifs

La problématique de la représentation multiple et ses divers volets ayant été présentés, nous pouvons décrire les différentes approches abordant cette question et situer le projet de recherche MurMur, dont il est ici question. La représentation multiple dans les bases de données, qu'elles soient géographiques ou non, a d'abord été étudiée de façon générale [PAPAZOGLOU et al 94], [KILPELAINEN 98], [STEEL, WORBOYS 98], [TIMPF, FRANK 95] et [TIMPF 98].

Le laboratoire COGIT travaille sur le sujet à travers l'action de recherche « Unification des bases de données ». Concernant l'unification des bases de données géographiques : une réflexion est menée, d'une part, sur les schémas pour éviter la redondance sémantique entre les données (thèse de Nils Gesbert). Il s'agit de l'approche notée « Base de schémas liés » de la problématique décrite page 77. D'autre part, une réflexion est menée sur les données pour l'interprétation des incohérences et différences entre les diverses représentations (thèse de David Shereen). Cette approche se rapporte au thème (4) de la problématique développée plus haut. Ces deux travaux nécessitent une étude très poussée des spécifications des bases.

Le projet européen IST-1999-10723, nommé MurMur (MUltiple Resolution, MUltiple Representation), se propose de traiter une première partie du problème de l'unification, liée à la modélisation. Son objectif est de développer et d'expérimenter une plate-forme de représentation multiple, dotée d'outils permettant de modéliser une base de données spatio-temporelles à représentation multiple, d'implémenter la structure de cette base dans un système de gestion de bases de données (SGBD) et d'interroger cette base en prenant en compte la dimension des représentations. La problématique décrite au paragraphe précédent est donc abordée dans MurMur par les thèmes (2), (3) et (6).

Dans cet objectif, le projet MurMur a réuni six partenaires entre janvier 2000 et juin 2002 : le producteur de SIG Star Informatics, l'Université Libre de Bruxelles (ULB), l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), l'Université de Lausanne (UNIL), le CEMAGREF (organisme français public de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) et l'IGN. Ces deux derniers acteurs y participent en tant que producteurs et utilisateurs de données géographiques. Ils ne participent pas aux développements mais fixent les besoins et spécifications et testent les logiciels produits.

L'adresse du site du projet MurMur est : http://lbdwww.epfl.ch/e/MurMur/. Les résultats publiés ici sont donc basés sur le travail commun des partenaires de MurMur. Le but du projet MurMur est de combiner les résolutions et les points de vue, de façon générique, sans présumer des bases à réunir. Une telle approche n'avait encore jamais été menée. À la suite de cette introduction, nous allons présenter, dans une deuxième partie, les bases de MurMur : la démarche de création d'une base de données à représentation multiple, ainsi que le langage de modélisation MADS, choisi pour le projet. La troisième et dernière partie exposent les résultats de l'implémentation mise en œuvre dans MurMur.

MADS et les étapes du projet MurMur

Dans cette partie, le paragraphe « *Généralités* » définit le vocabulaire utilisé par la suite sur les bases de données, ainsi que la démarche générale et les différentes possibilités de création d'une base de données à représentation multiple. Les étapes du projet MurMur sont précisées au regard de cette démarche. Pour la conception des schémas de données, un langage très complet de modélisation intégrant la représentation multiple, nommé MADS, a été adopté pour le projet. Le deuxième paragraphe « *Conception du schéma unifié* », page 77, est une présentation de ce langage et en particulier, de sa dimension de représentation multiple.

Le vocabulaire et la démarche

Généralités

Le déroulement du projet MurMur repose sur les étapes de création d'une base de données à représentation multiple à partir de bases de données existantes. La démarche est illustrée sur la figure B.5.3, page suivante.

Afin que ces étapes et les explications ultérieures soient bien claires, un petit lexique rappelle, en figure B.5.2, page suivante, la définition de quelques termes couramment employés dans le domaine des bases de données.

Système de gestion de bases de données ou SGBD (exemple : Oracle) : ensemble de logiciels système permettant aux utilisateurs d'insérer, de stocker, de modifier et de rechercher efficacement des données spécifiques dans une grande masse d'informations partagées par de multiples utilisateurs.

Langage de modélisation (exemple : UML) : ensemble de concepts et de règles de composition de ces concepts permettant de décrire les données. Le langage de modélisation repose sur un modèle conceptuel (par exemple relationnel, entité-relation ou orienté-objet) et est rendu perceptible grâce à des conventions graphiques.

Schéma conceptuel de données : description, à l'aide d'un langage de modélisation particulier, des données d'une organisation ou d'une partie d'organisation en termes de types d'objets et de liens logiques, indépendante de toute représentation en machine de l'organisation modélisée.

Schéma logique de données : décrit la manière dont les éléments du schéma conceptuel de données sont implémentés dans le SGBD sélectionné (par exemple, sous forme de tables relationnelles ou objet-relationnelles).

Schéma physique : description des données d'une base en termes de représentation physique en machine, correspondant à la spécification des méthodes de mémorisation, de stockage et d'accès utilisées pour ranger et retrouver les données sur le disque (compilation du schéma logique en machine sous forme de fichiers).

Assistant de Génie Logiciel (AGL) : logiciel d'aide à la modélisation. Il permet d'éditer graphiquement des schémas de données. Pour cela, l'AGL utilise des conventions graphiques particulières et des annotations, qui reposent sur un langage de modélisation existant. Par exemple, l'AGL Objecteering repose sur le langage de modélisation UML. Suivant les cas, l'AGL peut offrir d'autres fonctionnalités : en particulier, il peut prendre en charge la *traduction* du schéma édité en un schéma logique pour un SGBD spécifié. Il peut aussi, à l'inverse, déduire un schéma de données dans le langage de modélisation propre à l'AGL, à partir d'un schéma logique existant dans un SGBD connu de l'AGL (*reverse engineering*).

figure B.5.2 *: quelques définitions, d'après* [DONNAY 00] *modifié*

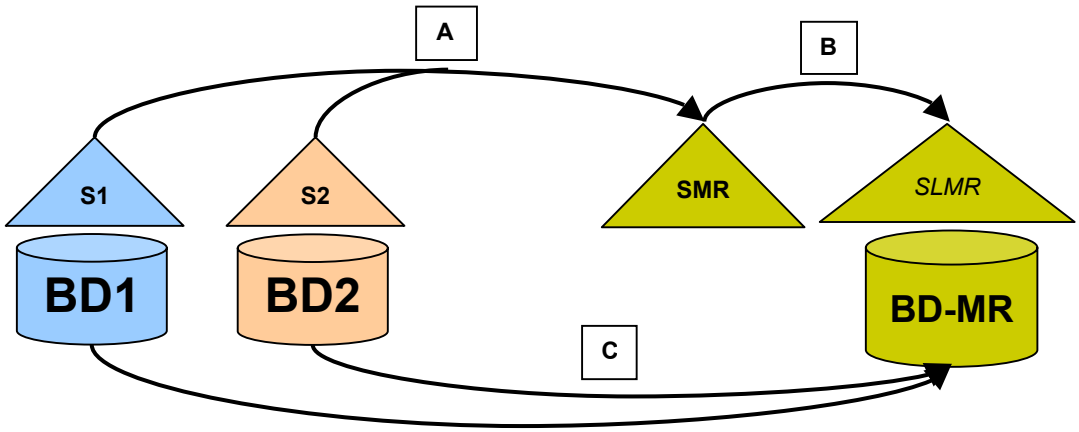


figure B.5.3 *: démarche de création d'une base de données à représentation multiple, à partir de bases existantes (voir les explications dans le texte).*

Sur la figure B.5.3, BD1 et BD2 sont les bases de données de départ. Leurs schémas conceptuels de données sont S1 et S2. La première étape (A sur le schéma) consiste, après une étude approfondie de S1 et S2, à concevoir un schéma conceptuel de données SMR à représentation multiple qui intègre les concepts de S1 et S2 en les liant de différentes façons.

La deuxième étape (B) consiste à transformer le schéma SMR en un schéma logique SLMR dans le SGBD, choisi pour accueillir la future base de données. La troisième étape (C) consiste à peupler la structure SLMR avec les données de BD1 et BD2, en s'aidant des règles de passage produites lors des étapes A et B, afin de créer la base BD-MR à représentation multiple. L'étape C nécessite, au préalable, d'apparier les données de BD1 et BD2 afin de connaître les liens de correspondance à intégrer dans BD-MR.

Conception du schéma unifié

L'étape (A) de conception du schéma à représentation multiple mérite ici d'être précisée : faire fusionner les schémas existants sans perdre d'information, ni générer un résultat peu commode pour l'utilisation, constitue le sujet de ce paragraphe. Parmi les travaux existants sur la représentation multiple dans les bases de données (DEVOGELE 97), on peut identifier trois solutions à ce problème. Il est important de noter que chacune de ces solutions conserve toute l'information contenue dans les bases initiales.

Base à schémas liés

La première solution consiste à modifier légèrement les données et les schémas afin de permettre des liaisons entre eux (figure B.5.4). Les liaisons inter-schémas sont conçues au regard des spécifications de contenu de chaque base. Elles seront définies par des relations de correspondance si le langage MADS est utilisé (voir paragraphe « Un langage de modélisation : MADS », page 79). Quant aux liaisons inter-données (instanciation des précédentes), leur création nécessite une étape d'appariement non évoquée ici.

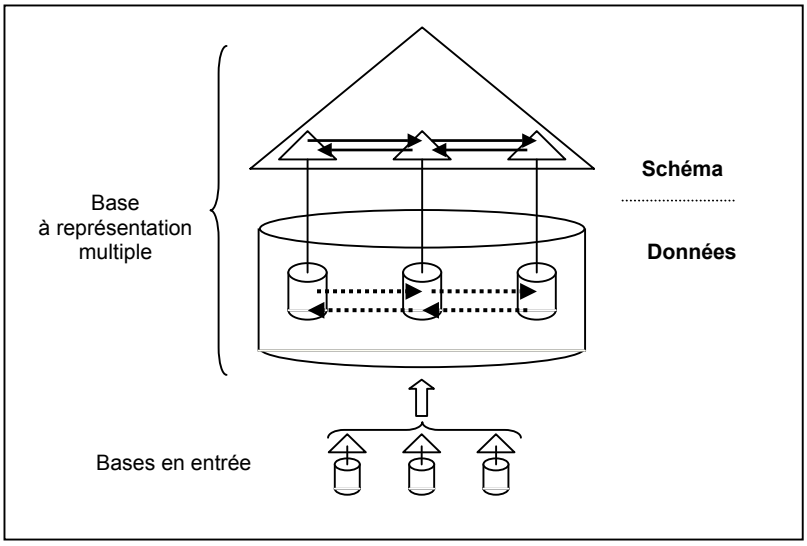


figure B.5.4

Passage de trois bases de données à représentation unique à une base de données à représentation multiple : solution des schémas liés. Le schéma global de la base de données résultat est, en fait, composé des trois sous-schémas liés. Les liens de correspondance entre schémas sont représentés par les flèches pleines, leurs instances par des flèches en pointillés.

Une telle solution gère la représentation multiple sans utiliser de type d'objet à représentation multiple. Elle peut s'imposer lorsque les bases de départ sont trop différentes pour que leurs objets fusionnent. Elle peut également constituer un choix : ce type de schéma permet, en effet, d'interroger indépendamment les anciennes bases, ce qui constitue un avantage pour certaines opérations mais n'est pas très adapté aux requêtes sur les concepts généraux. Cette solution a été largement choisie dans le cas d'étude IGN du projet MurMur. D'autres exemples sont fournis dans [KILPENAINEN 98].

Base à schémas fédérés

La deuxième solution consiste à conserver les bases initiales telles quelles et à créer en amont un schéma global fédérant les concepts initiaux (figure B.5.5, page 80). Ce schéma peut comporter des types à représentation multiple, dont « héritent » les types d'objets initiaux.

Dans le cas du langage MADS, où le concept d'héritage au niveau des classes est remplacé par un concept de hiérarchie avec instanciation multiple (l'objet de la classe dérivée est répété dans la classe parente), ces types fédérateurs à représentation multiple sont instanciés. Il est donc nécessaire d'ajouter des objets à la base.

Cette solution, un peu lourde à mettre en place, permet de faire ressortir les concepts communs aux différentes représentations, même si les objets sont, par ailleurs, très différents. Elle s'avère utile lorsque l'utilisateur désire conserver ses objets initiaux mais a besoin de concepts fédérateurs : les requêtes s'expriment aussi facilement sur les premiers que sur les seconds. Un exemple est fourni dans [NAJA 98].

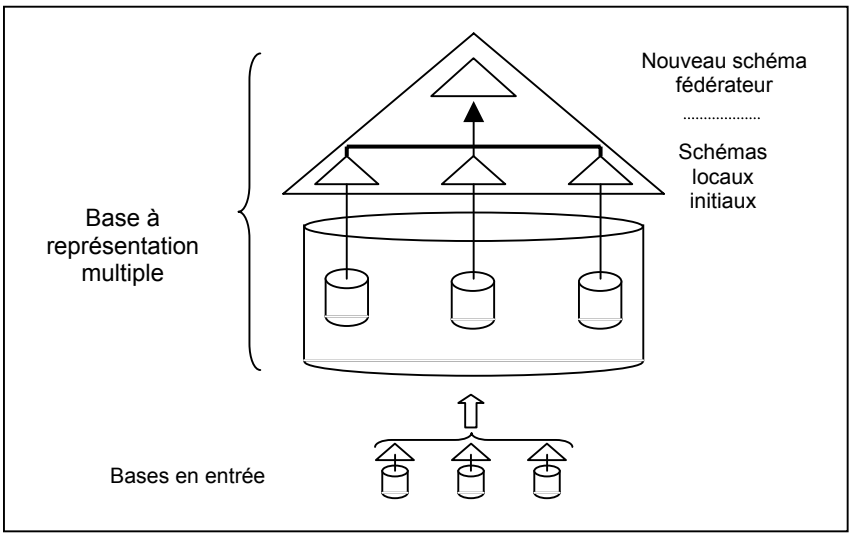


figure B.5.5

Passage de trois bases de données à représentation unique à une base de données à représentation multiple : solution des schémas fédérés. Chaque schéma local hérite des caractéristiques communes aux différentes représentations depuis le schéma fédérateur, tout en gardant les spécificités de sa propre représentation.

Base à schéma centralisé

La troisième solution d'architecture résulte en un schéma central unique (figure B.5.6). Toute l'information de chaque base de données initiale est réorganisée dans ce schéma, *via* des types d'objets et de relations à représentation multiple. Dans ce cas, de nouvelles instances sont donc créées. Cette solution, obtenue par fusion, est difficile à mettre en œuvre si les bases initiales sont trop éloignées. Elle est utile lorsque l'utilisateur désire un vision synthétique de ses données. Par contre, elle est mal adaptée aux requêtes sur les objets initiaux (un prédicat sur la représentation des objets est nécessaire).

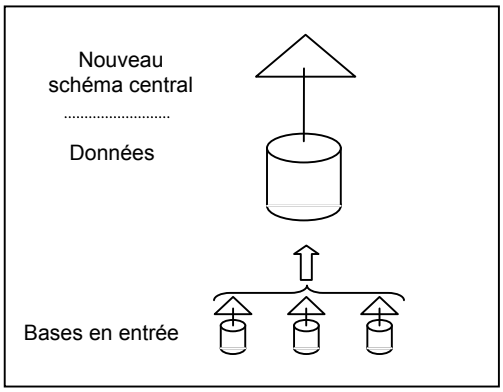


figure B.5.6

Passage de trois bases de données à représentation unique à une base de données à représentation multiple : solution des schémas fédérés.

Ces trois solutions de conception répondent ainsi à des besoins un peu différents, bien qu'elles soient parfaitement équivalentes du point de vue des données stockées. Une fois ces précisions données sur la conception du schéma unifié, nous allons détailler les étapes du projet.

Les étapes du projet MurMur

Le projet MurMur reprend les trois étapes « standard » présentées en figure B.5.3, qui sont la conception du schéma à représentation multiple (A), l'implémentation de ce schéma dans un SGBD (B) et le peuplement de la base (C), mais d'un point de vue de développement d'outils (figure B.5.7) :

- le premier outil, antérieur au projet, est un langage de modélisation nommé MADS [Parent et al 99], supportant les dimensions spatiale et temporelle ainsi que la représentation multiple. Il facilite énormément l'étape A de conception du schéma ;
- le deuxième outil est un assistant de génie logiciel, l'éditeur MADS, reposant sur le langage MADS. En permettant l'édition interactive du schéma et en vérifiant sa validité vis-à-vis des règles du langage MADS, il participe également à l'étape A. Cet AGL constitue le premier développement du projet MurMur ;
- le troisième outil est un logiciel de traduction, partie intégrante de l'AGL, permettant de transformer le schéma en langage MADS en un schéma logique dans un SGBD choisi (en l'occurrence, pour le projet, le SGBD Oracle 9i à dimension spatiale). Il s'agit de l'étape 2 du projet, qui répond aux besoins de l'étape B de la création d'une base à représentation multiple. Il faut rappeler, ici, que ce traducteur est indispensable non seulement pour interpréter le langage MADS, mais aussi parce que les SGBD ne permettent pas, par défaut, de porter la représentation multiple ;
- l'étape C, le peuplement de la base, ne bénéficie d'aucun développement dans le cadre du projet ;
- le dernier outil ne concerne plus la création de la base, mais son exploitation. Il s'agit d'un système de visualisation des données (type logiciel SIG) et d'un moteur de requêtes à représentation multiple : ce moteur repose sur une algèbre MADS, reprenant tous les concepts du langage de modélisation. Son originalité est de permettre une édition graphique de la requête, à partir du schéma de données qui a été construit dans l'AGL. Il s'agit de la troisième étape de développement du projet.

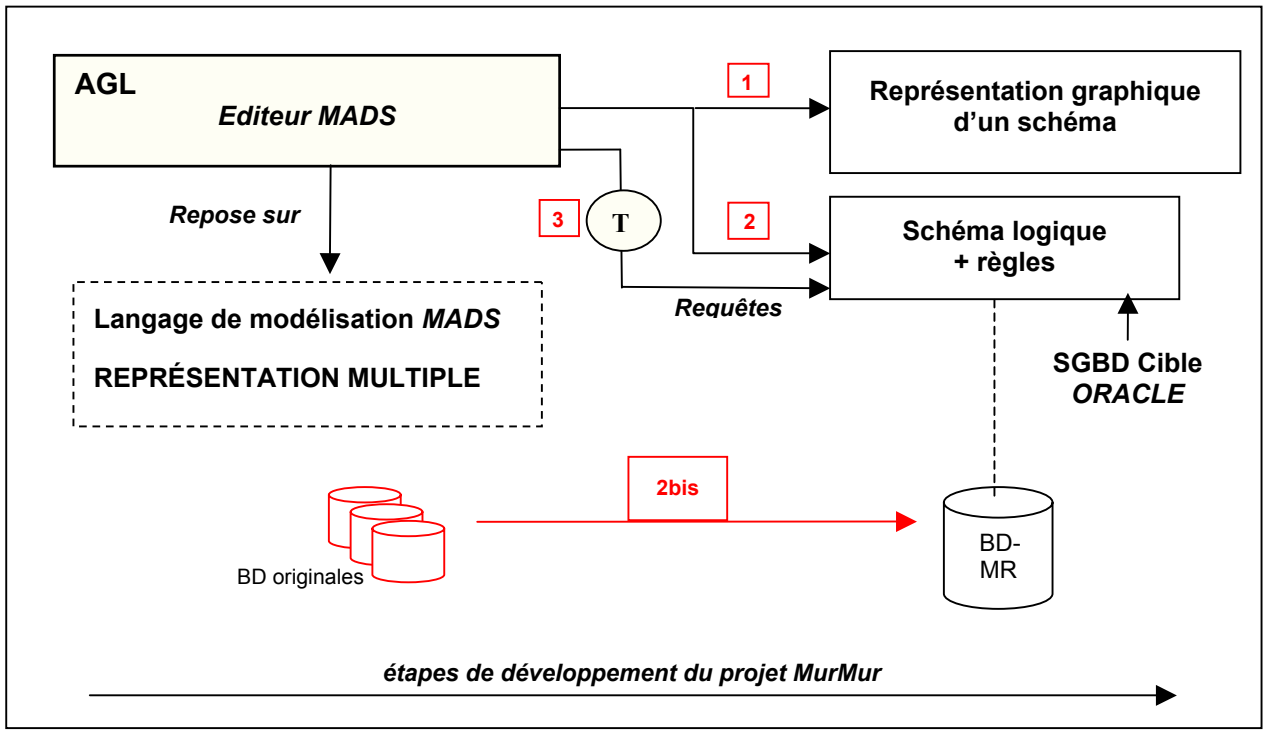


figure B.5.7 *: les étapes de développement du projet MurMur.*
L'élément noté T à l'étape 3 représente le traducteur du schéma

Les étapes du projet ayant été décrites, l'outil « pré-requis » qu'est le langage de modélisation MADS va être présenté. Les étapes 1, 2 et 3 de la figure B.5.7 seront illustrées par un exemple du cas d'étude IGN et par les résultats du développement dans une troisième partie dédiée à la mise en œuvre de ces étapes lors du projet. Les problèmes dus à l'instanciation de la base à représentation multiple, au moment où l'on passe du point de vue général de conception d'une base au point de vue particulier des instances, ne seront pas traités.

Un langage de modélisation : MADS

MADS signifie Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles. Ce langage a été développé à l'EPFL (Lausanne) et est décrit dans [PARENT et al 99] et [VANGENOT 01]. Il s'agit à la base d'un langage de type entité-relation, qui s'est enrichi de concepts orientés-objet : méthodes, liens de hiérarchie. Ce modèle supporte la représentation des types selon trois dimensions indépendantes « classiques » : les dimensions thématique, spatiale et temporelle. Un exemple de type MADS est présenté figure B.5.8.

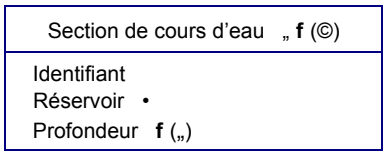


***figure B.5.8** : le type d'objet « section de cours d'eau » modélisé avec MADS*

Sur la figure B.5.8, la classe géographique dépend à la fois de l'espace et du temps. Elle comporte un attribut géométrie de type « ligne orientée », matérialisé par l'icône „. Cet attribut peut varier en fonction du temps, comme l'indique l'icône f (©). Cette classe comporte aussi trois attributs thématiques : Identifiant, Réservoir et Profondeur. Réservoir est un attribut complexe, avec un sous-attribut géométrie de type ponctuel. Profondeur est un attribut simple, dont la valeur varie en fonction du point de l'objet considéré, comme l'indique l'icône f („).

La quatrième dimension indépendante du langage est celle des représentations. En MADS, une représentation est définie par un point de vue et une résolution, saisis tous deux sous forme de chaînes de caractères. Un objet « porte » la mention d'une représentation si cet objet existe dans le point de vue considéré et est visible à la résolution considérée.

Il y a deux façons de traduire la représentation multiple en MADS :

- affecter plusieurs représentations à une même classe, en utilisant des estampilles pour les différencier ;
- avoir plusieurs classes à représentation unique et lier ces classes par une relation de correspondance.

Premier outil de modélisation de la représentation multiple : les estampilles

En MADS, tout type de données (classe, attribut, relation, méthode) peut avoir plusieurs représentations, auquel cas les différentes représentations de l'entité géographique sont incluses dans une seule et même instance qui possède plusieurs définitions ou plusieurs géométries. Chaque représentation apparaît sur le schéma sous forme d'estampille colorée, placée sur les classes ou à côté des attributs.

Chaque objet porte toutes les estampilles des représentations dans lesquelles il est visible. Un objet portant les estampilles de plusieurs représentations peut aussi voir ses caractéristiques (type de géométrie, existence et définition des attributs…) modifiées selon la représentation considérée : dans ce cas, il faut préciser que telle ou telle propriété est variable en fonction de la représentation. Un objet à représentation unique porte zéro ou une estampille. Un exemple est développé en figure B.5.9.

Deuxième outil de modélisation de la représentation multiple : les relations de correspondance

Il existe une deuxième solution pour modéliser la représentation multiple, qui contrairement à la précédente n'utilise pas d'objets à représentation multiple : selon cette solution, deux représentations d'un phénomène réel restent deux instances différentes dans deux classes différentes. Ces instances sont liées par une relation de correspondance, un type particulier de relation réservé à la représentation multiple.

Il existe trois types de liens de correspondance :

- *en cas de cardinalité 1-1* : la relation d'identité (un nom un peu trompeur, puisque les objets liés sont différents et n'ont pas le même identifiant : la tendance actuelle est de parler de relation équivalence ou de co-référence) ;
- *en cas de cardinalité 1-n* : la relation d'agrégation (dans le cas de deux résolutions différentes, il est fréquent qu'un arc routier d'une base à faible résolution corresponde à un ensemble d'arcs de la base à résolution élevée, ou encore qu'une surface « école » d'une base à faible résolution corresponde à plusieurs bâtiments dans la seconde base). Contrairement aux deux autres types de relation de correspondance, la relation d'agrégation n'est pas uniquement réservée à la représentation multiple ;
- *en cas de cardinalité n-m* : la relation « set to set », mettant deux ensembles d'entités en correspondance. Cette solution s'impose quand il est impossible de relier précisément les deux bases, par exemple : quand un pâté de cinq bâtiments, dans une base, n'est représenté que par trois bâtiments, après généralisation, dans une autre moins détaillée. Dans ce cas, on préférera créer une nouvelle entité, « groupe de bâtiments », qui possède deux représentations différentes modélisées par deux relations d'agrégation (dans le sens « est composé de » et non « correspond à ») vers les bâtiments.

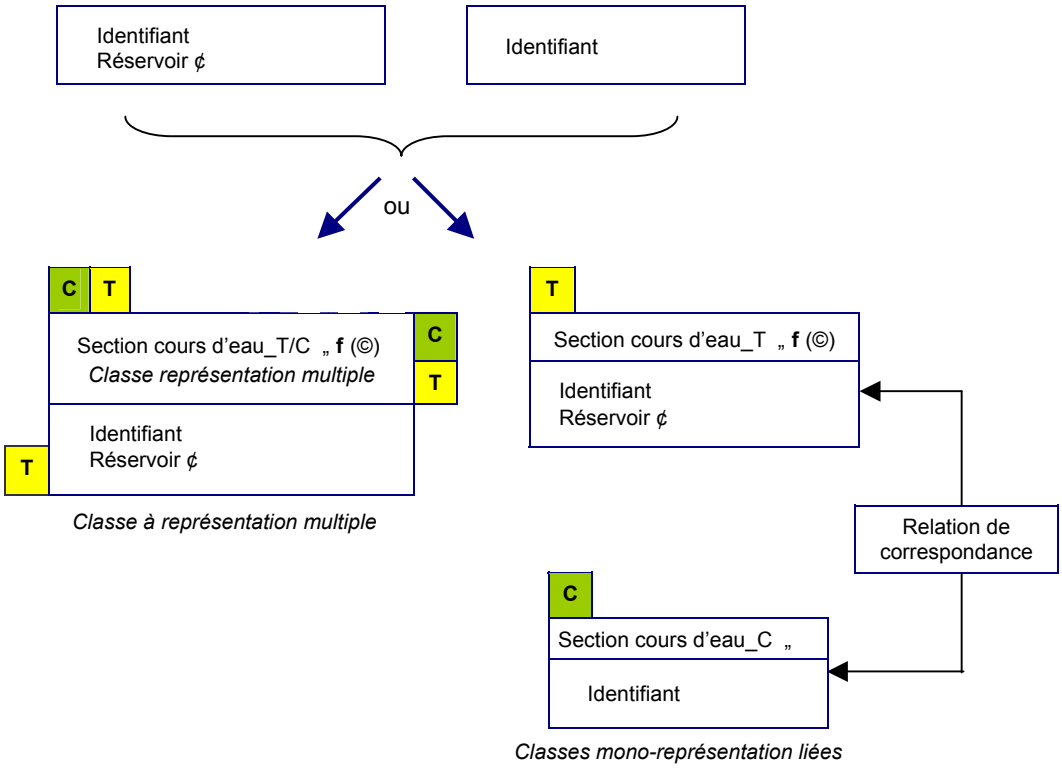


figure B.5.9 *: les deux expressions de la représentation multiple*

La figure B.5.9 illustre ces deux solutions de modélisation de la représentation multiple. Au sommet, les deux classes d'objets concernent le même phénomène géographique. Elles ne sont pas estampillées dans leur état d'origine, mais correspondent à deux représentations différentes : point de vue topographique et résolution élevée, ou point de vue cartographique et résolution plus faible.

Les deux solutions d'unification sont présentées sous l'accolade :

- une classe à représentation multiple (à gauche). La classe porte les deux estampilles : T pour (point de vue topographique, résolution élevée) et C pour (point de vue cartographique, résolution faible), elle est donc visible dans les deux représentations. Sa géométrie possède deux définitions différentes, chacune correspondant à une seule estampille. Par défaut, l'attribut Identifiant est accessible dans les deux résolutions et sa valeur ne change pas de l'une à l'autre (puisque l'objet est unique).

Par contre l'attribut Réservoir n'est accessible qu'en représentation « à visée topographique » :

- deux classes à représentation unique (à gauche). Elles sont inchangées, mais estampillées et liées par une relation de correspondance.

Mise en œuvre dans le projet MurMur

Un exemple de schéma MADS

Le cas d'étude choisi est représenté en langage MADS sur la figure B.5.10. Il consiste à rassembler une partie des thèmes routiers de la BD Topo, de la BD Carto et de Géoroute. Devant les différences d'attributs et surtout de géométrie (les tronçons se correspondent rarement deux à deux, mais plutôt sous forme d'agrégation dans un sens ou dans l'autre), le choix d'une architecture à schémas liés a été arrêté.

Il est possible, par contre, de définir l'objet complexe Route, reposant sur un code de route (par exemple : Nationale 20) et dont les représentations s'apparient très facilement entre deux bases de données. Cet objet a donc permis la création d'une classe à représentation multiple intégrée dans le schéma : celui-ci est donc une solution hybride, permettant de traiter le maximum de cas de représentations multiples.

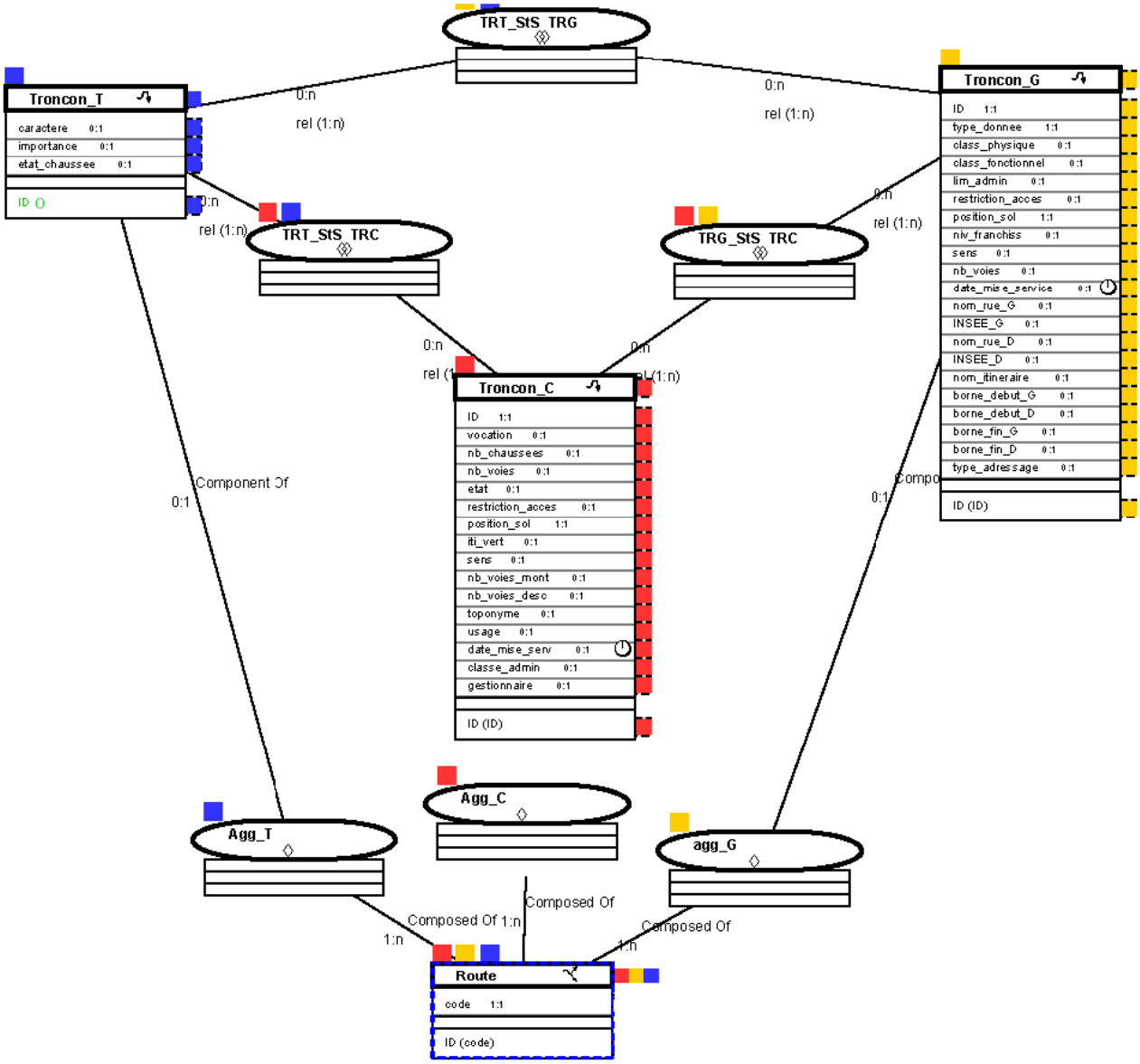


figure B.5.10 *: un extrait du schéma IGN adopté pendant le projet MurMur*

Les types Tronçon_T, Tronçon_G et Tronçon_C, les tronçons routiers des trois bases considérées sont tous à représentation unique, d'où les simples estampilles bleues, jaunes et rouges. Ces objets sont liés entre eux par des relations de correspondance du type Set to set (relations TRT_StS_TRC, TRT_StS_TRG, TRG_StS_TRC), pour traiter le cas le plus général. Pour respecter la grammaire MADS, ces relations portent les deux estampilles des objets qu'elles relient.

La classe route est, par contre, à triple représentation. Son domaine géométrique n'est plus « arc orienté » mais « ensemble d'arcs orientés », car il s'agit d'une agrégation de tronçons. Cette géométrie dépend de la représentation considérée. Les relations Agg_T, Agg_G, Agg_C sont des relations d'agrégation. Chacune s'adresse à une seule représentation des objets de type Route, et ne porte par conséquent qu'une estampille.

L'éditeur MADS

L'édition

L'assistant de génie logiciel permet la saisie interactive d'un schéma en langage MADS, soit graphiquement, soit à partir d'une bibliothèque de types. Pour chaque type d'objet ou de relation il est possible de définir une géométrie, une temporalité, des méthodes et des attributs.

La saisie des propriétés des attributs est particulièrement complète par rapport à d'autres AGL : simples, dérivés ou complexes, les attributs peuvent voir définis, entre autres, leur dépendance au temps, à l'espace ou à la représentation, leur type d'héritage, leurs sous-attributs, leur dépendance à d'autres attributs. De plus, à tous les types de données (objets, relations, méthodes ou attributs) peuvent être attribués des commentaires en mode texte.

L'éditeur est équipé d'un outil de validation, vérifiant que le schéma saisi est en accord avec les règles de syntaxe et de grammaire de MADS.

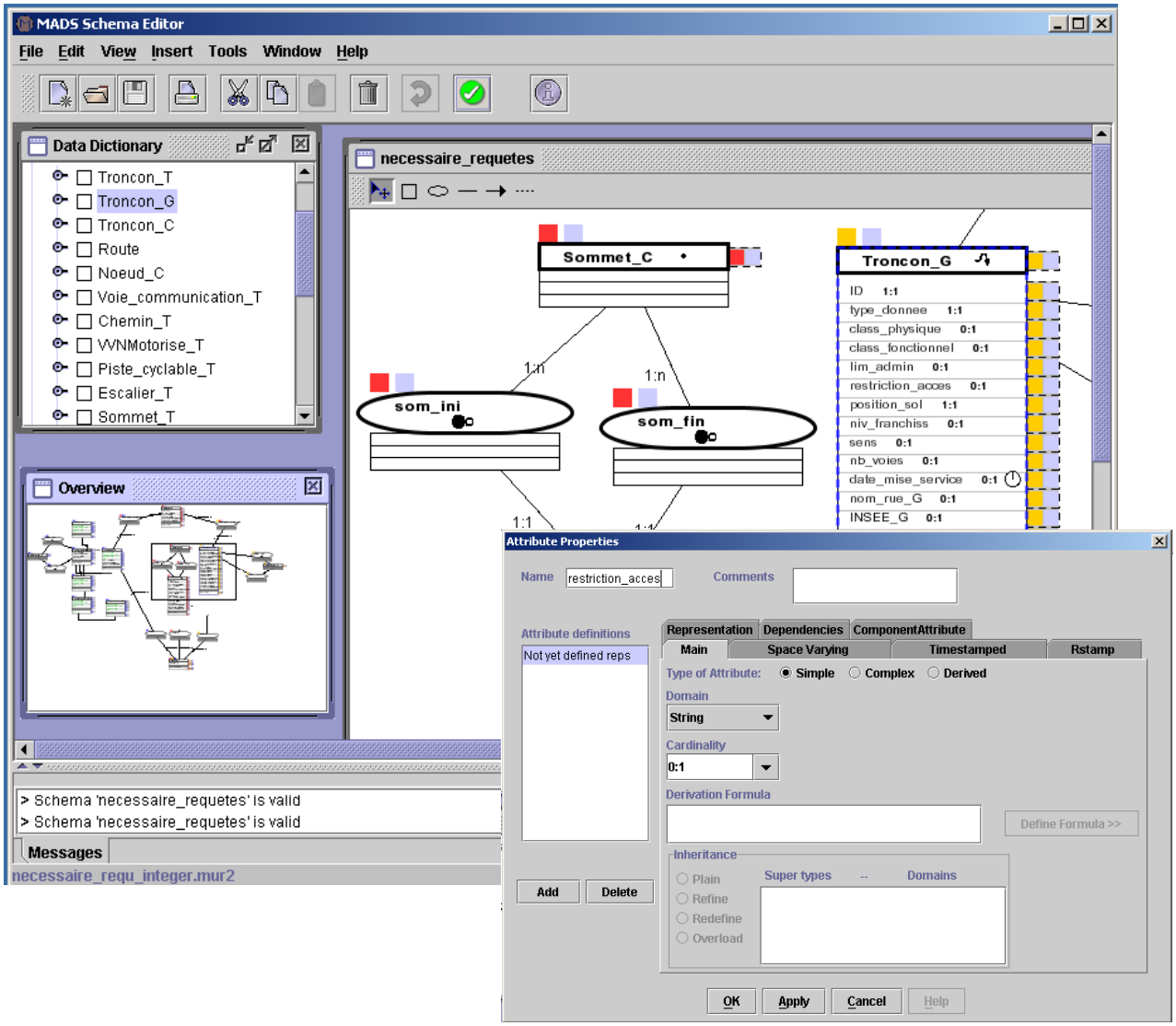


figure B.5.10 *: l'interface de l'éditeur MADS.*

Fenêtre principale (le schéma est accessible en sélectionnant les objets dans la grande fenêtre graphique ou dans le dictionnaire de données, dans le coin supérieur gauche. La fenêtre inférieure est réservée aux messages d'erreur ou de validation du schéma, au regard des règles du langage MADS) et fenêtre de propriétés d'un attribut.

L'export et la traduction

Un schéma MADS n'est lisible que dans l'éditeur. Une transformation est nécessaire pour en faire un document « échangeable », ainsi que pour l'implémenter dans un SGBD. C'est le rôle des modules d'export et de traduction. Un schéma édité peut être exporté depuis l'AGL, en un fichier de description de données au format xml (extended markup language). Accompagné de son fichier dtd (data type description), le schéma xml constitue un document standard.

Le module de traduction du schéma conceptuel de données en un schéma logique est également intégré dans l'AGL. À partir d'un schéma saisi à l'écran ou d'un fichier xml, ce module agit en deux étapes :

- il passe du langage MADS à un langage « MADS- », débarrassé des concepts de haut niveau : les estampilles, la représentation multiple, la temporalité, sont décomposées et transformées en des attributs « basiques ». La base peut ainsi être accueillie par un SGBD classique. Bien entendu, cette perte ne concerne pas l'utilisateur, qui continuera à travailler sur son schéma en langage MADS, lors de l'étape d'interrogation, la traduction étant réalisée de façon transparente vers la structure logique de la base ;
- il traduit ce schéma « MADS- » aux concepts universels, en un schéma logique en utilisant la syntaxe propriétaire d'un SGBD.

Si le SGBD Oracle est le seul cas traité au cours du projet (le résultat de la traduction est un script en langage SQL de création de tables), cette traduction en deux étapes favorise la traduction vers divers systèmes, comme Arcview ou d'autres SIG.

Ce processus de traduction est toutefois limité : les méthodes, contraintes d'intégrité et formules de dérivation ou de dépendance ne dépassent pas le stade du schéma de données où elles sont saisies en mode texte. Le schéma logique ne contient donc qu'une partie de l'information du schéma édité. D'autre part, le *reverse engineering* ou passage d'un schéma logique à un schéma de données en langage MADS, n'est pas pris en charge par le logiciel, ce qui est pourtant le cas dans certains AGL du marché utilisant d'autres langages de modélisation. Aucun de ces AGL ne permet toutefois de modéliser des données géographiques.

La formulation des requêtes

Une fois la base à représentation multiple créée et peuplée, son exploitation nécessite un langage et un moteur de requête. Le SGBD Oracle, choisi pour le projet, associé au langage SQL, constitue un tel outil. Mais l'utiliser signifie interroger la base directement *via* son modèle logique (c'est-à-dire ses tables). Or, ce modèle n'est qu'une adaptation du schéma MADS, dans laquelle estampilles et liens de correspondance ont été décomposés en divers champs. Afin d'éviter à l'utilisateur de se plonger dans cette structure et d'éditer lui-même ses requêtes en langage SQL, un éditeur graphique de requêtes a été développé. Celui-ci permet d'interroger la base à partir du schéma MADS, sans se soucier du SGBD stockant effectivement les données.

Ce paragraphe n'est qu'un aperçu du mode d'édition graphique des requêtes, le logiciel correspondant étant pour l'heure en phase de développement. La figure B.5.11, page suivante, en présente l'interface. La fenêtre supérieure contient le schéma de la base de données, en mode lecture seulement. Certains objets de ce schéma peuvent être glissés dans la fenêtre située juste au dessous, afin de créer le schéma de la requête. Une troisième fenêtre permet d'entrer les prédicats de la requête : sur la valeur des attributs, la géométrie des objets, la représentation.

Le logiciel se charge de traduire en opérateurs MADS, cette requête exprimée graphiquement. Elle sera ensuite transcrite dans le langage de requête propre au SGBD choisi et envoyée vers la base. Une fenêtre de visualisation des données accompagne ce constructeur de requêtes pour afficher les réponses de la base. Ce mode d'édition à partir du schéma conceptuel est original et offre le gros avantage de s'affranchir de tout langage de manipulation de données. L'apprentissage du langage de modélisation MADS est donc le seul pré-requis à l'utilisation de la plate-forme MurMur.

Conclusion

La représentation multiple promet d'importantes améliorations dans la gestion et l'utilisation des bases de données géographiques : elle permet, en particulier, une saisie moins redondante des données, la gestion des incohérences entre bases et des études à plusieurs niveaux d'analyse. Comme nous l'avons vu, des solutions théoriques existent pour concevoir de telles bases de données, mais les réalisations étaient jusqu'ici ponctuelles. Il faut, à présent, prendre en compte le projet de préparation des lignes de productions « Unification des Bases de Données », lancé à l'IGN, en mars 2002. Ce projet devrait donner naissance à une « BD Uni » résultant de la fusion de plusieurs bases, ainsi qu'aux outils nécessaires à sa mise à jour.

Le projet MurMur, en développant un outil général, s'appuie sur ces solution théoriques et traite un grand nombre de problèmes pratiques : le choix du langage de modélisation, la prise en charge de la représentation multiple, la correction du schéma conceptuel de données et son transfert vers un SGBD, ainsi que la traduction et l'exécution des requêtes dans ce même SGBD. Dans le cas idéal où tous les objectifs de développements seraient atteints à la fin du projet, il n'incomberait plus à l'utilisateur de la plate-forme MurMur que la conception de sa base à représentation multiple, l'appariement de ses données et leur chargement dans la nouvelle base, avant de pouvoir l'exploiter.

De façon plus réaliste, il faut prévoir que les requêtes autorisées par le système seront encore sommaires à la fin du projet. Or, la structure logique à représentation multiple, générée dans le SGBD Oracle, est très lourde et donc difficile à manipuler en dehors des logiciels MurMur. L'exploitation des bases risque de s'avérer difficile. Gageons cependant que le projet aura apporté un outil de conception solide, précis et exploitable. Il s'agit de l'éditeur MADS qui permet de « penser » l'information géographique à représentation multiple et de formaliser les contraintes de la base : les cardinalités et les domaines parmi les nombreux prédéfinis, mais aussi la dépendance et la dérivation entre attributs, le type d'héritage ou d'autres précisions encore sous forme de commentaires en mode texte. La perte de certaines de ces spécifications lors de la traduction du schéma reste liée à l'insuffisance des SGBD géographiques.

Pour l'IGN, le second résultat de sa participation au projet, est une amélioration de sa compréhension des problèmes liés à la représentation multiple et des solutions techniques dans le domaine de la modélisation, essentiellement.

D'autres problèmes restent à résoudre : la gestion de la représentation multiple au niveau des instances (problèmes d'incohérence dus, par exemple, à des mises à jour décalées, un non-respect des spécifications ou des écarts hors norme), qui n'a pas été traitée ici, est tout aussi importante que sa gestion au niveau des schémas. Même si d'importants travaux ont été faits [DEVOGELE 97], [BADARD 01], ce problème est toujours étudié en recherche. Au laboratoire COGIT, il est étudié dans l'axe de recherche « *Unification des bases de données* ».

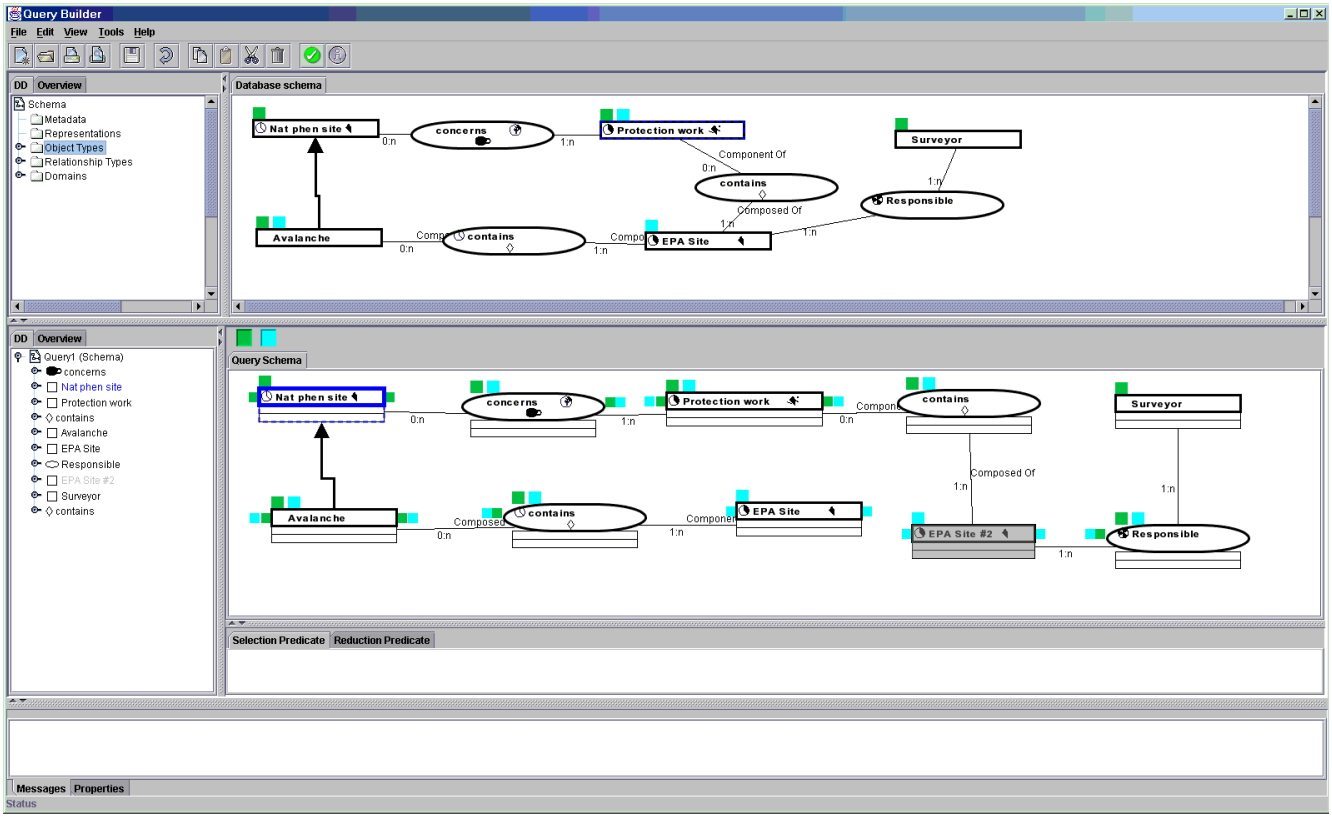


figure B.5.11 *: l'interface du constructeur de requêtes*

La représentation multiple est appelée à se développer dans les SIG. Des réalisations, autres que le projet MurMur, ont déjà vu le jour ou sont programmées [BERNIER 02], [VOISIN 01]. Si ces applications permettent de faire collaborer plusieurs représentations entre elles, en développant, par exemple, des zooms élaborés, la distinction entre représentation et affichage doit être claire. En aucun cas, il n'est question de rassembler sur un écran « un maximum d'informations », toutes résolutions ou points de vue confondus, et ce, à n'importe quelle échelle, car une telle cartographie mêlant les différents niveaux de raisonnement pourrait s'avérer peu significatif et impropre à l'analyse. Pourtant, rien n'est plus simple avec un SIG et une base de données à représentation multiple : des règles devront s'intégrer aux outils, afin d'assurer une cohérence au cours de l'utilisation de données à représentation multiple.

Références

[BERNIER 02] E. Bernier : *Utilisation de la représentation multiple comme support à la génération de vues de bases de données géospatiales dans un contexte SOLAP,* mémoire de M.Sc, faculté de foresterie et géomatique, Université Laval, Québec (Canada), 2002.

[DONNAY 00] J.-P. Donnay : *Cours de Bases de données,* Département de Géomatique, Université de Liège (B), 2000.

[KILPELAINEN 98] T. Kilpelainen : *Maintenance of topographic data by multiple representations,* in Actes de la conférence annuelle GIS/LIS'98, Forth Worth, Texas (USA), 1998.

[NAJA 98] : H. Naja : *La représentation multiple pour l'ingénierie,* in L'objet, 4[2], 1998.

[PARENT et al 99] C. Parent, S. Spaccapietra and E. Zimanyi : *Spatio-temporal conceptual models : Data structure + space + time*, in Actes de la conférence GIS'99, Kansas City, Missouri (USA), 1999.

[PARENT 00] C. Parent : *A framework for characterizing spatio-temporal data models*, in Advances in databases and multimedia for the new century - A Swiss-Japanese perspective, World scientific publishing, Singapour (Malaisie), 2000.

[VANGENOT 01] C. Vangenot : *Représentation multiple dans les bases de données géographiques*, thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2001.

[VOISIN 01] P. Voisin : *La représentation multiple des individus géographiques dans un SIG,* stage à l'Atelier Géomatique du Conseil de Seine-Saint-Denis, 2001.

Publications

[BADARD 00] T. Badard : *Propagation des mises à jours dans les bases de données géographiques représentation multiples par analyse des changements géographique,* thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité : Sciences de l'Information Géographique, directeur de thèse : Jean-Paul Cheylan, laboratoire COGIT, IGN-SR-00-026/S-THE-TB, soutenue le 15 décembre 2000.

[DAVID, FASQUEL 97] Benoît David & Pascal Fasquel : *Qualité d'une base de données géographique : concepts et terminologie,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 67, 1997/3, laboratoire COGIT, IGN-SR-97-052/S-ART-BDPF, 1997.

[DEVOGELE 97] Thomas 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, spécialité : Méthodes Informatiques, directeur de thèse : Eric Simon, laboratoire COGIT, IGN-SR-97-025/S-THE-TD, soutenue le 15 décembre 1997.

[MurMur2 00a] Consortium MurMur : *User's feedback on MurMur's data modeling approach*, rapport D2 à la commission Européenne, laboratoire COGIT, IGN-SR-00-041/S-RAP, juin 2000.

[MurMur4 00b] Consortium MurMur : *State of the art review*, rapport D4 à la commission Européenne, laboratoire COGIT, IGN-SR-00-042/S-RAP, septembre 2000.

[MurMur5 00c] Consortium MurMur : *Data model specification*, rapport D5 à la commission Européenne, laboratoire COGIT, IGN-SR-00-044/S-RAP, septembre 2000.

B.6 Exagération des formes basée sur une nouvelle modélisation du linéaire routier

Jean-Georges Affholder

Position du problème

Ainsi que le précise l'intitulé de la présente contribution, nous ne prétendons traiter que d'un des nombreux problèmes que pose la généralisation du linéaire routier. Mais auparavant, nous souhaitons, sans entrer dans les détails, attirer l'attention sur la spécificité de cette généralisation, par rapport à celle d'autres objets linéaires : trait de côte, courbes de niveau et réseau hydrographique essentiellement, spécificité liée, à la fois à la nature géométrique de l'objet représenté et à la nature de la représentation. En ce qui concerne ce dernier point, nous pensons évidemment aux problèmes liés à la largeur du signe conventionnel.

Quant aux problèmes liés à la nature géométrique de l'objet, contentons-nous de mentionner, pour le trait de côte, l'aspect fractal qu'il peut revêtir et qui rend alors, peu adaptées, les formes traditionnelles de modélisation.

Pour les courbes de niveau, l'importance des opérateurs d'exagération destinés à laisser visibles certains aspects du paysage (présence de thalwegs non représentables, si l'on respecte strictement l'échelle de la carte).

Pour le réseau hydrographique, son côté mixte, tantôt linéaire, tantôt surfacique.
(*NB* : on pourrait ajouter que, pour certains auteurs, le terme de réseau hydrographique est impropre. Il y a là plus qu'un simple problème de terminologie : pour eux, le terme de réseau renvoie à un ensemble connexe, alors que sur une carte, le réseau hydrographique, si l'on ne tient pas compte des canaux, est en fait un ensemble non connexe. On n'aura donc pas, en généralisation, le même type de conflits qu'avec le routier).

Nous avons commencé par dire que nous ne traiterions, ici, que d'un problème particulier. Mais, dans l'état actuel de nos travaux, nous pensons pouvoir affirmer que la modélisation que nous proposons s'adapte à la plupart des autres problèmes de généralisation, que nous voudrions donc récapituler brièvement :

- conflits avec les objets voisins, de même nature (risque de recouvrement partiel entre deux tronçons de routier voisins) ou non (risque de recouvrement avec une rivière, une voie ferrée, du bâti...) ;
- auto-conflits le long d'un arc de routier, pris isolément, si lors du passage à une échelle plus petite, on se contente d'une simple homothétie (lorsque les virages sont très serrés, il s'agira d'éviter le phénomène d'empâtement; lorsque les épingles à cheveux sont très rapprochés, il faudra éviter les superpositions, par suppression, fusion, ou par déplacement de virages) ;
- problème de la caricature (assimilable à une affinité) et d'exagération (assimilable à une homothétie) de virages trop petits pour pouvoir être représentés à l'échelle, mais que l'on ne souhaite pas voir disparaître de la carte.

La littérature sur la généralisation traite ces problèmes, le plus souvent, au moyen de divers algorithmes appliqués directement à une polygonale issue du scannage des planches mères (on est passé à une polygonale par un algorithme de squelettisation). Pour notre part, nous proposons une autre modélisation que nous pensons mieux adaptée car respectant davantage la réalité aussi bien de l'objet géographique (la route elle-même) que de l'objet cartographique (sa représentation).

Principes de base de notre modélisation

Dans un premier temps, nous passons de la polygonale initiale à une courbe C_2, i.e. à une courbe continue ayant en tout point une tangente continue. Concrètement, nous passons de la polygonale à une autre polygonale superposable à la première, par fragmentation de ses segments, de façon à avoir une polygonale approximativement équirépartie.

Á cette polygonale nous appliquons un lissage gaussien suivi du traitement par l'algorithme de Lowe, afin de supprimer l'effet « raccourcissement des virages » induit par le lissage.
(*NB* : cette partie du traitement ayant fait l'objet d'une communication lors de précédentes Journées de la Recherche de l'IGN, nous ne nous y attarderons pas).

Nous aboutissons ainsi à une suite de points à chacun desquels nous pouvons affecter une rayon de courbure. Par interpolation, nous pouvons assimiler cette suite de points à une courbe continue en chaque point de laquelle nous pouvons calculer le rayon de courbure en fonction de l'abscisse curviligne. La figure B.6.1, page suivante, nous montre en noir, un fragment de la polygonale initiale et en rouge, la C_2 que nous en avons déduit. Outre son plus grand réalisme, la représentation C_2 a l'avantage de bien se prêter à la segmentation de l'objet cartographique au moyen de points caractéristiques : il s'agit essentiellement des points d'inflexion (PIs) et des sommets, i.e. des points correspondant à un maximum de courbure.

L'étude de la variation de la courbure est d'ailleurs à la base de nos algorithmes : pour en rester au seul problème de l'empâtement, il est intuitif que plus la courbure est forte, plus le risque en est grand. Une pareille représentation, faisant intervenir dans la pratique un très grand nombre de points, ne se prête guère à la suite des opérations, d'où l'idée de substituer à la courbe C_2 une suite de d'éléments géométriques simples, i.e., de passer de la C_2 à une courbe C_2. C'est ce que nous allons voir à présent.

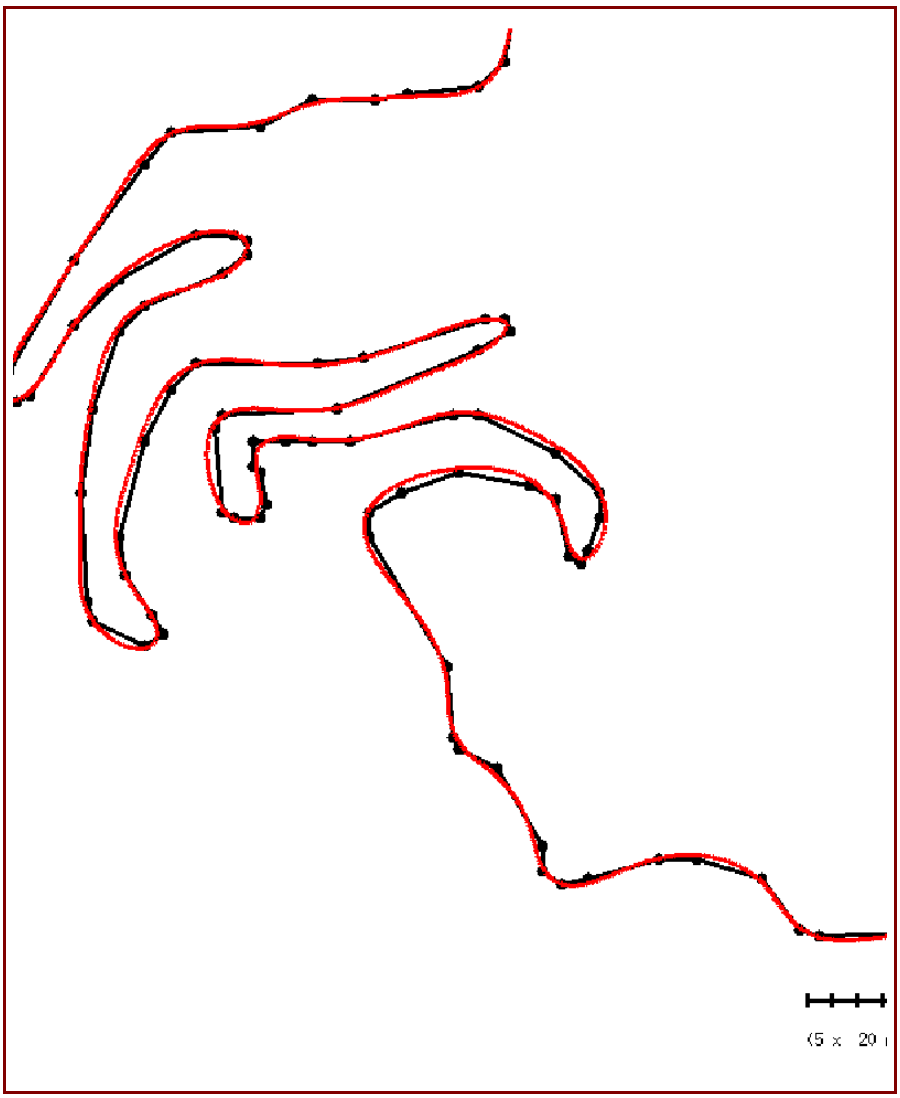


figure B.6.1 *: en noir, un fragment de la polygonale initiale et en rouge, la C_2 que nous en avons déduit*

Remarques sur la modélisation d'un virage isolé

Dans le cas le plus simple, un sens de parcours ayant été arbitrairement choisi, un virage se compose d'une courbe d'entrée, du sommet du virage (nous désignerons ainsi, aussi bien un point qu'un élément de longueur non nulle, le contexte permettant de lever toute ambiguïté) et d'une courbe de sortie.

Sur le terrain et *a fortiori* sur la carte, le sommet peut être assimilé à un arc de cercle. Quant aux courbes d'entrée et de sortie (courbes de raccordement du sommet à des zones droites ou à courbure très faible), ce sont, sur le terrain, des clothoïdes, i.e. des courbes, telles que la courbure soit fonction linéaire de l'abscisse curviligne. À l'échelle de la carte, elles s'approximent très bien par des cubiques d'équation ($y = ax^3$) dans un repère convenablement choisi. Toutefois, comme nos algorithmes de généralisation font appel à l'équation intrinsèque, nous renonçons à l'approximation par cubique.

Nous n'utilisons pas non plus la clothoïde, mais la courbe que nous appelons provisoirement CL2, définie par une courbure proportionnelle non pas à l'abscisse curviligne, mais à sa racine carrée. En effet, pour cette dernière courbe le rapport y/x (dans un repère évident) peut atteindre 13,3..., contre 1,76... pour une clothoïde, ce qui diminue le nombre de cas où le problème du raccordement est sans solution. Ceci apparaît plus clairement dans les figures B.6.2 et B.6.3, pages suivantes.

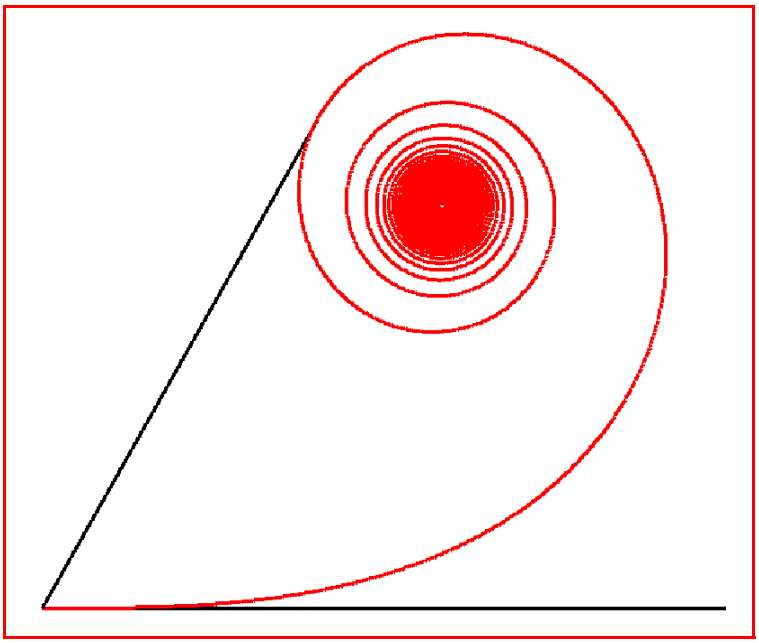


figure B.6.2 *: clothoïde*

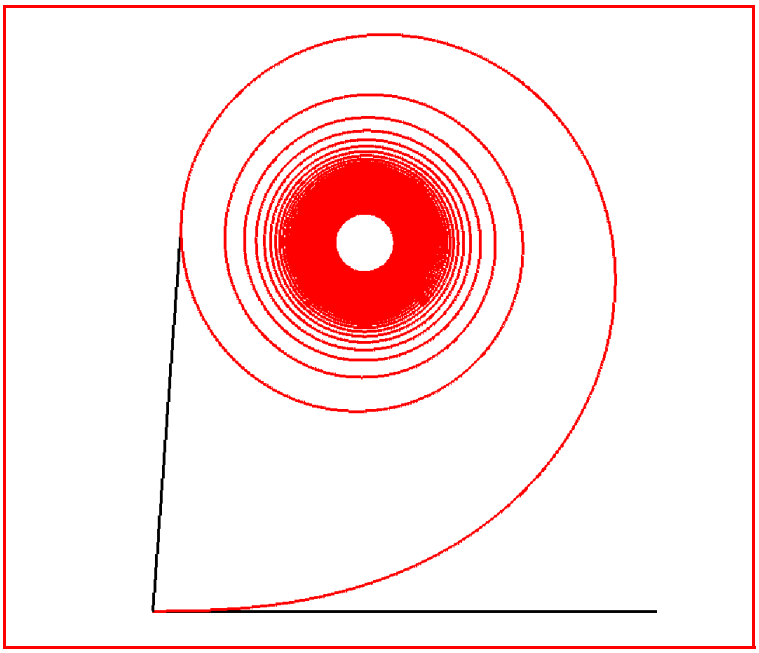


figure B.6.3 *: CL2*

De la courbe C_2 à une courbe C_1

Pour simplifier les notations, nous appellerons C_2 le tableau des N couples $[s_i, c_i]$ décrivant la courbe C_2 déduite de la polygonale initiale de n points, N étant évidemment très supérieur à n, les s_i désignant des longueurs d'arc élémentaire et les c_i des courbures, et C_1 son approximation par segments de droite, arcs de cercles et éventuellement courbes de raccordement.

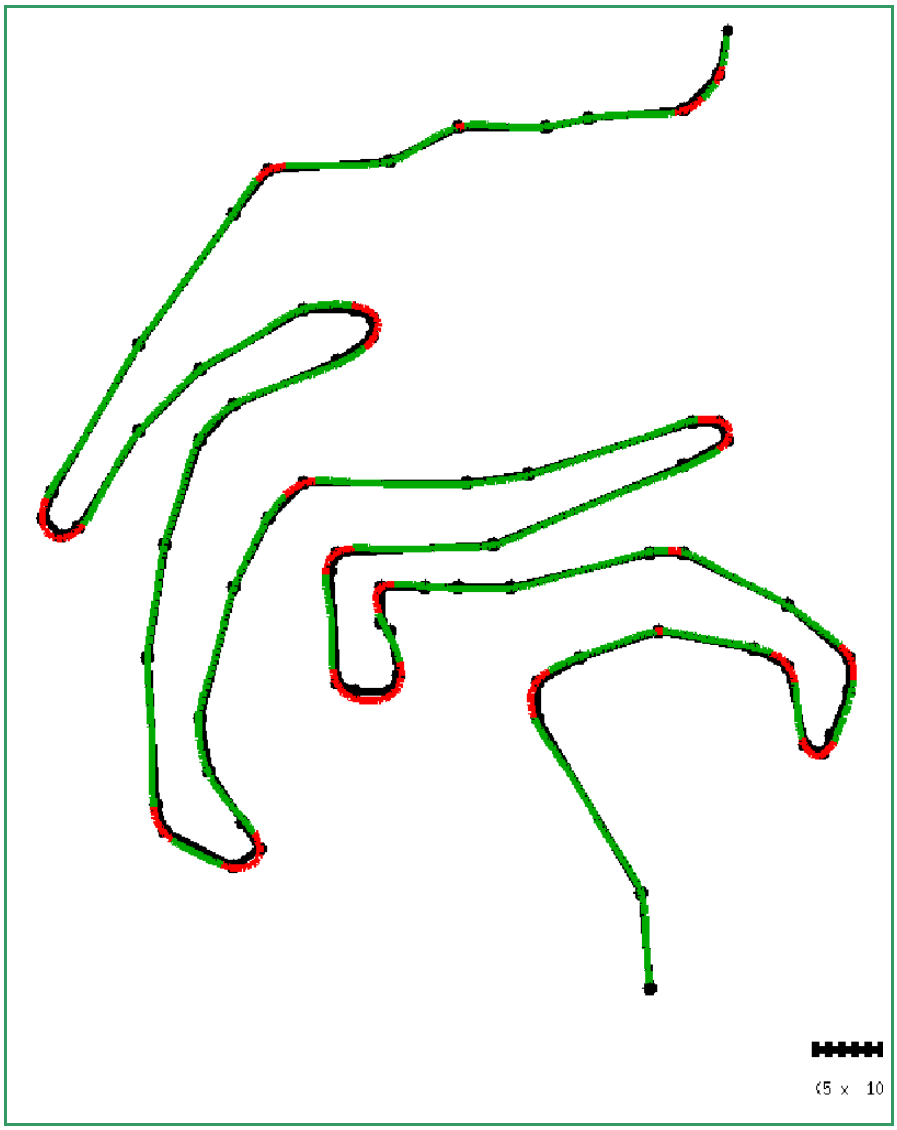
C_2 nous permet de détecter de façon triviale les deux types de conflits internes, i.e. de conflits liés à l'arc de routier pris isolément :

- les *empâtements* : nous considérons qu'il y a empâtement, en un point donné, quand le rayon de courbure, ramené à l'échelle, est inférieur à la demi-largeur du signe conventionnel ;
- les *superpositions* : en simplifiant quelque peu, il y a superposition de deux points de C_2 lorsque leur différence d'abscisse curviligne dépasse le double de la largeur du signe conventionnel (et dans la réalité, elle peut être très grande), mais que leur distance, ramenée à l'échelle, est inférieure à cette largeur. Une simple recherche combinatoire permet de détecter les zones de superposition.

La détection des empâtements et des superpositions a une retombée que nous nous permettons de trouver du plus haut intérêt : elle résout le problème du tronçonnage.
(*NB* : nous appelons tronçon le résultat d'une segmentation de l'arc tel que chaque tronçon puisse être généralisé indépendamment des tronçons encadrant (à la réserve près de la question de la propagation amortie).

Nous pourrons ainsi identifier les tronçons sans conflit, i.e. les tronçons peu sinueux, et où il n'y aura donc pas de problème de généralisation, une simple homothétie faisant l'affaire. À l'intérieur des tronçons à conflit, notre modélisation nous permet d'identifier des sous-tronçons sans conflit qui pourront, moyennant certaines restrictions, constituer des contraintes de conservation dans les algorithmes de généralisation.

Les figures B.6.4 et B.6.5, ci-dessous, donnent le résultat de la recherche des empâtements d'une part, des superpositions d'autre part, sur des arcs de la feuille de Valence. La figure B.6.5 montre les conflits de proximité, détectés par l'algorithme trivial évoqué plus haut. Quant à la courbe C_1, elle nous permettra d'aboutir à des algorithmes réalisant les quatre opérations de base citées initialement, à savoir : la suppression, la fusion, l'exagération et la caricature de virages.



***figures B.6.4** : en noir : la polygonale initiale; en vert : la courbe C_2; en rouge, les zones d'empâtement*

Nous n'entendons pas entrer ici dans le détail des algorithmes de passage de C_2 à C_1, nous contentant de ce bref résumé :

- la modélisation C_2 nous permet une segmentation en sous-arcs délimités par deux PIs consécutifs ;
- nous traiterons indépendamment chacun de ces sous-arcs nous cherchons si un sous-arc donné peut être approximé par un arc de grand cercle (par opposition avec l'arc de petit cercle correspondant à un sommet de virage) ;

- si ce n'est pas le cas, nous recherchons une approximation par CL2 d'entrée, arc de cercle sommet du virage, CL2 de sortie. Si nous ne trouvons pas d'approximation satisfaisante, nous recherchons entre les deux PIs non plus un mais plusieurs sommets, que nous raccordons entre eux par des segments de droite ou des arcs de cercle, et aux Pis encadrant par des segments de droite ou des CL2.

L'application des algorithmes de généralisation à C_1 aboutit à une courbe de même nature, i.e. à un ensemble de segments de droite, d'arcs de cercle et de CL2. Ainsi que nous le verrons plus loin, cette courbe présente une certaine dérive par rapport à la polygonale initiale, sur laquelle on la ramène (coïncidence aux extrémités et éventuellement en un certain nombre de points caractéristiques intermédiaires) au moyen d'un algorithme de déplacement amorti.

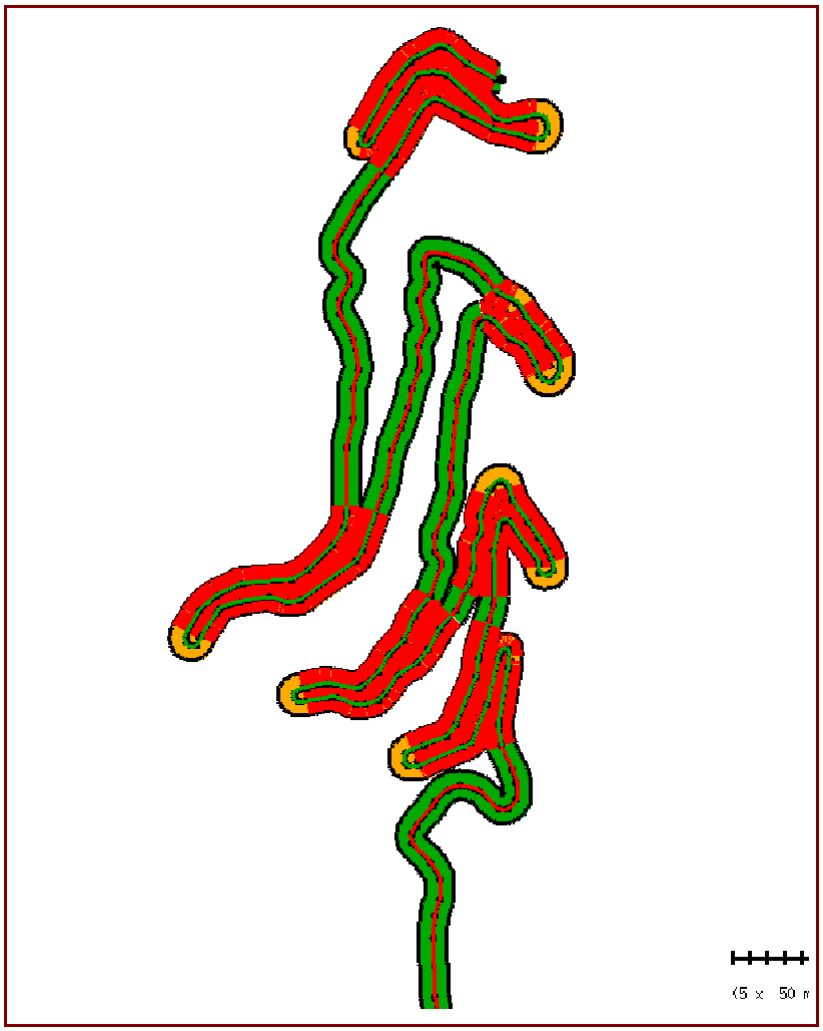


figure B.6.5

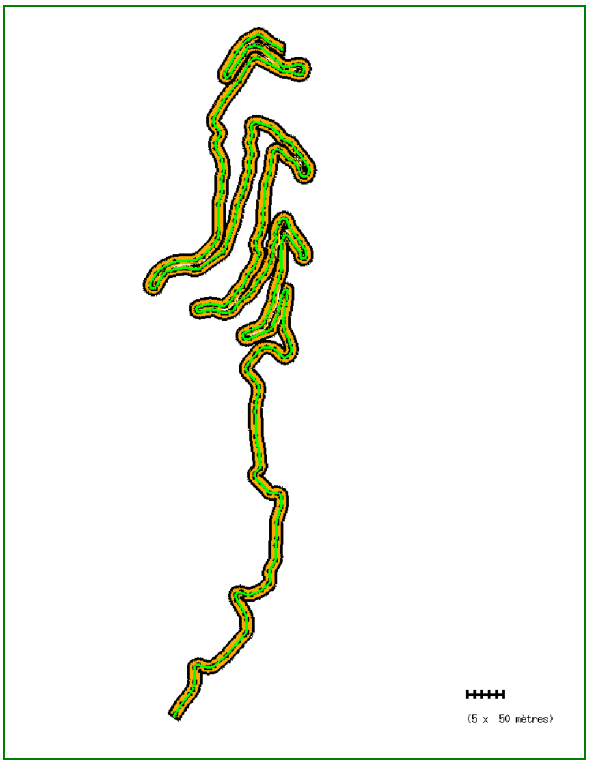
en rouge : les sous-tronçons en conflit de proximité,
en orange, ceux qui correspondent à un empâtement.

Application de la modélisation C_1 à l'exagération des formes

Si C_2 a suffi pour détecter les empâtements et les superpositions, c'est C_1 que nous utiliserons pour supprimer les empâtements (et, par la même occasion, la plus grande partie des superpositions).

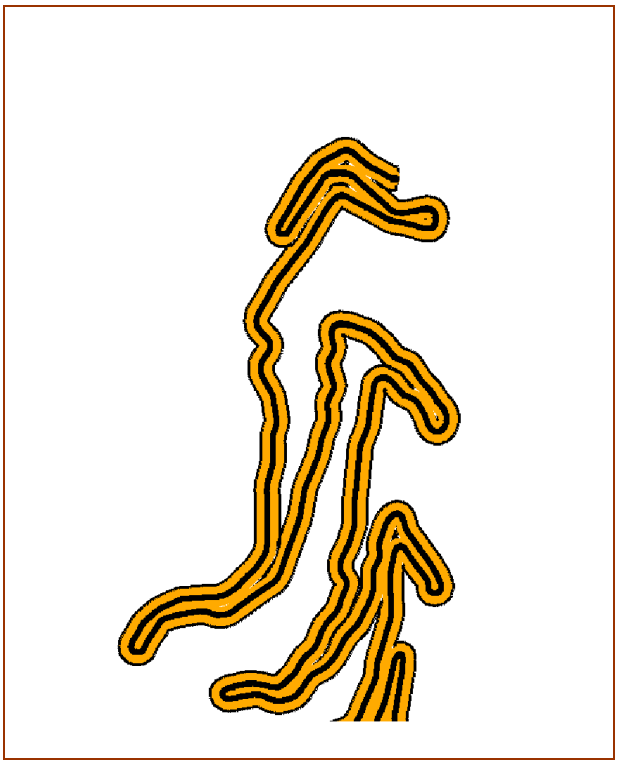
La méthode que nous appliquons est la suivante :

- nous recherchons, dans le fichier issu de la modélisation C_1, les arcs de cercle de rayon inférieur à la demi-largeur R (sur le terrain) du signe conventionnel dans la nouvelle représentation ;
- nous remplaçons ces arcs par des arcs homothétiques de rayon R ;
- nous ramenons la nouvelle courbe C_1 sur la polygonale initiale au moyen d'un algorithme de déplacement amorti fondé sur la conservation des formes dans les zones de faible courbure. Ceci signifie que cet algorithme impose au déplacement différentiel d'être une fonction croissante de la courbure (concrètement, une zone plate subira alors un simple déplacement).



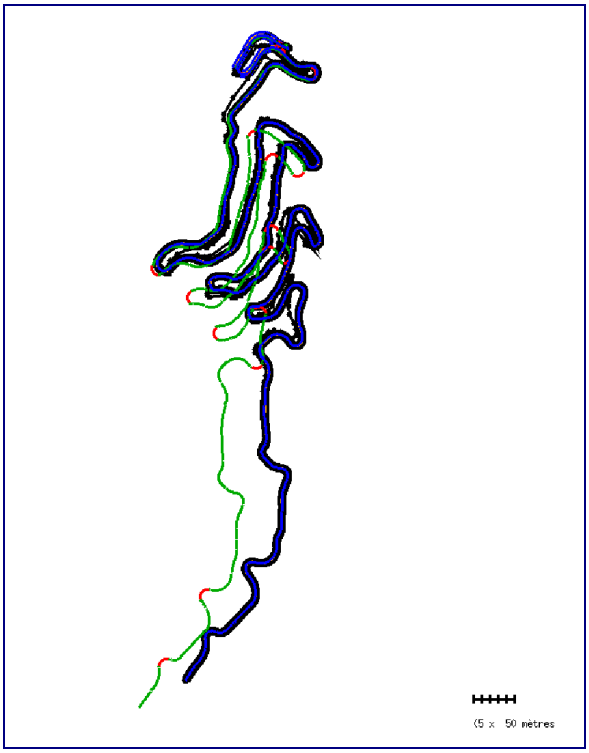
B.6.5

représentation avec la largeur de signe conventionnel du 1: 100 000

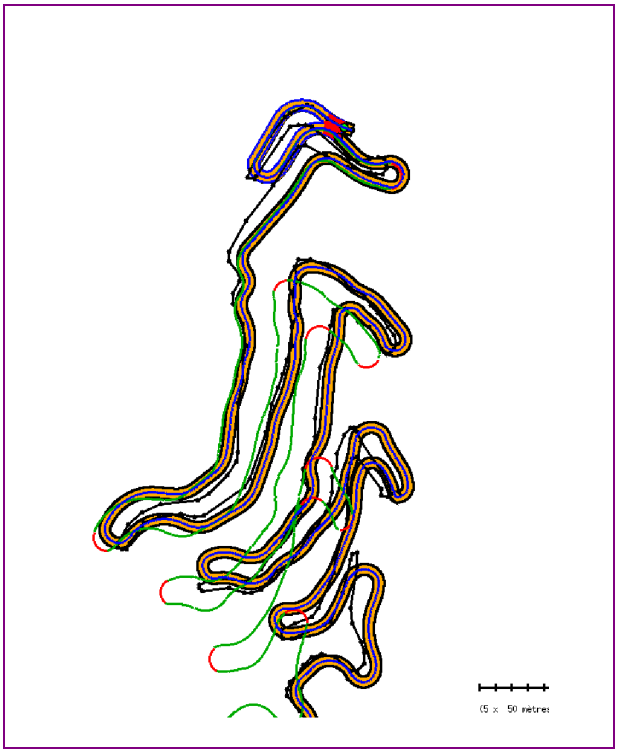


B.6.6

détail de la même représentation



B.6.7



B.6.8

Application des algorithmes d'exagération et de déplacement amorti. En vert : courbe issue de C1 par homothétie appliquée aux arcs de cercle de rayon inférieur à la demi-largeur du signe. En noir : la polygonale initiale.

On constate que l'on arrive à un résultat satisfaisant, à la réserve près du léger recouvrement qui subsiste dans la partie supérieure. Mais ce genre de conflit se traite sans difficulté. Quant aux algorithmes de caricature, qui sortent du cadre de cette brève étude, signalons qu'ils font intervenir essentiellement les CL2. Pour ce qui concerne enfin les problèmes de suppression et de fusion de virage, des solutions ont déjà été proposées dans la thèse de S. Mustière.

B.7 Étude de la flexion continentale sous la charge océanique à partir des données RGP

Marie-Noëlle Bouin

Introduction

L'Ouest de la France est une région d'un intérêt particulier en ce qui concerne les marées océaniques : sur les côtes bretonnes, à Brest par exemple, l'amplitude des variations de hauteur d'eau atteint douze mètres. Par ailleurs, la présence du plateau continental tout autour de la façade atlantique, le découpage complexe des côtes et un point amphidronique pour l'onde principale de marées s'associent pour rendre le phénomène très complexe. Ainsi, les modèles globaux de marées ont, plus qu'ailleurs, des raisons de ne pas être complets et fiables.

Les variations de hauteur d'eau provoquent une déformation élastique de la lithosphère, avec des périodes correspondant aux périodes propres de la marée océanique, soit proches de 12 heures ou de 24 heures pour les termes principaux. Cette déformation affecte les composantes horizontales et verticales, avec un rapport d'amplitude de un à trois. Sur la Bretagne, les mouvements verticaux atteignent cinq à dix centimètres, soit nettement plus que la précision des mesures GPS.

L'étude qui a été effectuée avait pour but de répondre à plusieurs questions :

- peut-on utiliser l'outil GPS pour mesurer la surcharge océanique de manière absolue, et sur les trois composantes ? Quelle est la précision obtenue ?
- les mesures de surcharge sont-elles en accord avec les modèles, en particulier sur la pointe de la Bretagne et dans la Manche, où les modèles sont réputés incomplets et perfectibles ?
- du point de vue de l'utilisateur, l'effet de surcharge non modélisé peut-il être ressenti comme une perturbation, compte tenu des besoins typiques de précision des géomètres experts ?
- quelles sont les interactions entre ce type de mouvement vertical, de grande amplitude et fréquence sub-diurnale, et la troposphère telle qu'elle est perçue par les signaux GPS ? En particulier, a-t-on raison d'évaluer des paramètres de retards troposphériques sur des sessions de quelques heures ?

Sont concernés aussi bien les communautés scientifiques que les utilisateurs civils. Nous avons profité de l'opportunité fournie par le Réseau GPS Permanent français (RGP), qui comprend plusieurs stations enregistrant de manière continue depuis deux à trois ans, situées sur des endroits particulièrement intéressants pour la surcharge océanique : Brest (BRST), Le Mans (MANS) mais aussi Chizé (CHIZ) et Biarritz (BRTZ).

Une étude a déjà été menée avec des objectifs communs [VEY et al 02], à partir de données GPS de campagnes. L'intérêt des données continues, pour ce genre de travail, est multiple. Cela permet de ne pas être dépendant d'incidents ponctuels, qu'il s'agisse d'une défaillance du récepteur ou d'une perturbation météo particulièrement violente. Cela autorise surtout l'emploi d'outils de traitement du signal qui ne s'appliquent qu'à des séries temporelles suffisamment longues par rapport à la période du phénomène que l'on étudie.

Surcharge océanique

Les marées océaniques résultent de la superposition d'un ensemble d'ondes répertoriées en fonction de leur période approximative et de leur origine physique. Les composants principaux ont des périodes propres proches de 12 heures (dits semi-diurnes) ou de 24 heures (diurnes). On distingue alors les harmoniques principales M2, S2, N2, K2, puis O1, K1, P1 et Q1 par ordre d'amplitude décroissante. Le tableau B.7.1 (page suivante) résume ces principales ondes de marées.

En un point donné de la surface des océans, l'amplitude des variations de hauteur d'eau dépendra de plusieurs facteurs : la position relative de ce point par rapport aux ondes de marées dans l'absolu, mais aussi la bathymétrie et la proximité et le découpage de côtes. La présence d'un plateau continental, passage abrupt de fonds océaniques profonds à une bathymétrie plus réduite, comme c'est le cas sur la façade atlantique, va renforcer l'amplitude de marée. Une topographie côtière concave, avec détroits et golfes, induira des effets de repliements et de résonance renforçant l'effet de marée.

Les zones où l'amplitude maximale des marées est la plus forte (dépassant quelques mètres) se répartissent donc près des côtes découpées formant des baies presque fermées : golfe du Maine, sud-ouest de l'Alaska, façade Atlantique française, Manche, canal du Mozambique. À Brest, l'amplitude de marée est exceptionnellement forte puisqu'elle dépasse les douze mètres.

***tableau B.7.1** : harmoniques principales du signal de marée océanique*

Nom	*Origine*	*Période*	*Amplitude*
Semi-diurnes			
M2	Principale lunaire	12 h 25	100%
S2	Principale solaire	12 h 00	46,5%
N2	Majeure lunaire elliptique	12 h 40	19,1%
K2	Déclinaison luni-solaire	12 h 58	12,6%
Diurnes			
O1	Principale lunaire	12 h 49	41,5%
K1	Déclinaison luni-solaire	12 h 56	58,4%
P1	Principale solaire	12 h 04	19,3%
Q1	Majeure lunaire elliptique	12 h 52	7,9%

Plusieurs modèles permettent de décrire ces variations de hauteur d'eau avec une bonne précision. Ils sont tous fondés (à l'exception du modèle TPX0.5, [EGBERT et al 94]), utilisant uniquement des ajustements sur les données d'altimétrie spatiale de Topex Poseïdon) sur l'utilisation des équations de l'hydrodynamique. Leurs résultats sont ajustés à partir des contraintes provenant, dans un premier temps, des données de marégraphes qui présentent l'inconvénient d'être réparties de manière inégale et exclusivement en bordure des côtes.

Les premiers modèles manquaient donc de données et de précision dans les zones océaniques de l'hémisphère Sud. Depuis presque une décennie, les modèles prennent en compte les résultats de l'altimétrie satellitaire. Ils proposent donc une couverture spatiale à peu près complète (certains satellites ne couvrent pas les latitudes extrêmes) et homogène, sur des grilles de 0,5° ou de 0,25° de résolution. Les modèles les plus récents, dont nous avons utilisés les résultats, sont CSR4.0 [EANES, SCHULER 99], [FES 99] [LE PROVOST et al 98] et GOT00.2 [RAY 99].

Pour obtenir la surcharge résultant de ces variations de marées, on applique les variations de hauteur d'eau en un point, prédites par les modèles sur un modèle élastique de Terre solide. On obtient alors les coefficients correspondant aux amplitudes et phases sur les trois composantes du déplacement provoqué, et ceci pour chaque onde de marée décrite dans le tableau B.7.1. Dans cette étude, les calculs de déplacements tels que prédits par les modèles de marée déjà cités (TPX0.5, CSR4.0, FES99 et GOT00.2) ont été réalisés avec le logiciel en ligne OTLP [BOS, SCHERNECK].

On ne détaille pas les résultats de ces comparaisons de modèles ici. Sur tous les sites français pour lesquels le calcul a été effectué, aucune différence de phase n'a été observée entre les différents modèles. La différence d'amplitude entre les modèles est inférieure dans tous les cas à 15% de l'amplitude totale du déplacement prédit, et ceci quelle que soit la composante considérée.

Dans la suite, les comparaisons s'effectueront par rapport au modèle CSR4.0. Il s'agit d'un des modèles les plus complets, utilisant à la fois l'hydrodynamique, des données de marégraphes et des données d'altimétrie spatiale. Dans la mesure où les effets de marée et la surcharge qui en découle, sont extrêmement sensibles à des phénomènes locaux, la résolution des modèles de marée constitue un paramètre clef pour la fiabilité des prédictions d'effets de charge. La Bretagne et la Manche font partie des zones où ces effets locaux sont probablement encore insuffisamment pris en compte dans les modèles.

La figure B.7.1, page suivante, donne l'ordre de grandeur des déplacements maximaux sur la composante verticale pour l'onde lunaire semi-diurne M2, sur tous les sites considérés dans cette étude. Ces variations de hauteur s'accompagnent de déplacements horizontaux d'amplitude un tiers de ceux sur la verticale. Les périodes principales de ces déplacements sont voisines de 12 heures.

Les stations sur lesquelles on peut s'attendre à des effets de surcharge océanique détectables par GPS sont situées près de la façade atlantique : Brest, en premier lieu, avec 8 cm sur la verticale, de deux à trois sur l'horizontale, Chizé et Biarritz avec 2,5 à 3,5 cm sur la verticale, près d'un centimètre sur les composantes horizontales. Autour de la Méditerranée et sur les Alpes, l'amplitude de l'effet de charge sur la composante verticale dépasse à peine 1 cm et ne sera donc pas mesurable par GPS.

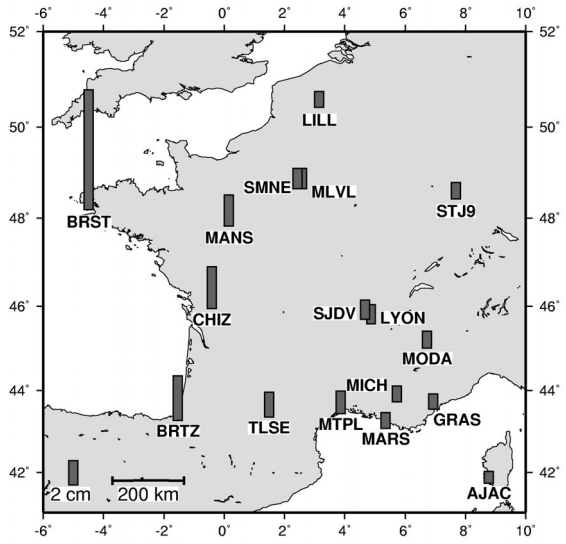


figure B.7.1 *: carte des stations du RGP avec l'amplitude des variations de hauteur dues à la surcharge océanique*

L'analyse des données du RGP

La période d'étude comprend dix mois, entre janvier et octobre 2001. C'est une période suffisamment longue pour obtenir des séries temporelles que l'on peut ensuite analyser avec les outils classiques de traitement du signal. Cette période a été choisie en fonction des dates d'installation des stations (Chizé n'est opérationnelle que depuis l'automne 2000, Biarritz depuis janvier 2001), et pour bénéficier de coefficients de marée variés.

À l'inverse de plusieurs études réalisées sur des sujets semblables, l'objectif ici était de mesurer les déplacements de manière absolue sur les positions de stations et non sur les lignes de base. Pour cela, il fallait donc assurer la cohérence du système de référence d'un jour à l'autre et d'une session à l'autre. Cela a été réalisé en ajustant le niveau des contraintes sur les positions *a priori* dans l'inversion GPS aux amplitudes de déplacement prédites sur les trois composantes.

Plusieurs types de calculs GPS ont été réalisés : afin de mesurer les effets de charge, de période proche de douze heures, la durée optimale des sessions GPS est proche de trois heures. Avec des sessions plus courtes, on ne fixe qu'un faible pourcentage d'ambiguïtés entières (il s'agit de la fraction entière de longueurs d'ondes des signaux GPS, inconnu au début du calcul et qu'il faut ensuite ajuster à sa valeur entière à partir d'une valeur réelle), puisque les longueurs des lignes de base dépassent 300 km.

Avec des sessions plus longues, on se rapproche de la fréquence de Nyquist (proche de 6 heures) des ondes de marées, et l'on risque d'écrêter le signal recherché. En plus de ces sessions de trois heures, nous avons calculé les données en session de 24 heures, pour voir si ce type de calcul de routine sur les réseaux permanents suffisait à moyenner les effets de marée. Afin de disposer d'une référence, nous avons utilisé la possibilité offerte maintenant par tous les logiciels scientifiques de calcul GPS, d'inclure une correction de surcharge océanique dans l'inversion GPS.

Le modèle de surcharge utilisé est toujours celui dérivé de CSR4.0. Au total, c'est donc quatre types d'analyses GPS qui ont été menées sur la période des dix mois :

- session de trois heures sans modèle de marée ;
- session de trois heures avec une correction de marée ;
- session de vingt-quatre heures sans correction de marée ;
- session de vingt-quatre heures avec correction de marée.

Ce dernier calcul étant destiné à servir de référence. Dans le cas des sessions de 3 heures, pour obtenir un bon échantillonnage du signal, on a calculé des sessions toutes les heures (avec donc un recouvrement de deux heures entre deux sessions successives).

Tous ces calculs ont été effectués avec le logiciel GAMIT [KING, BOCK 02] version 10.05 et des paramètres de calcul maintenant classiques en analyse GPS scientifique : les orbites IGS précises sont gardées fixes ainsi que les paramètres d'orientation de la Terre de l'IERS, Bulletin B, ce qui, avec les contraintes sur les positions *a priori* ITRF2000, suffit à définir le système de référence. L'angle de coupure en élévation des satellites est fixé à 10°, nous utilisons des modèles de marée terrestre et polaire dans le calcul.

Dans la mesure où l'un des objectifs était la mise en évidence des relations entre les variations de hauteur dues aux marées et les variations de retards troposphériques, nous avons porté une attention particulière à l'évaluation de ces paramètres troposphériques. Leur valeur *a priori* provient du modèle de [SAASTAMOINEN 72] et ils sont projetés depuis leur valeur zénithale par la fonction de Niell. Dans le cas de sessions de 3 heures, on a évalué un paramètre de retard troposphérique zénithal (ZTD dans la suite) toutes les quinze minutes. Dans le cas des sessions de 24 heures, les ZTD ont été évalués toutes les trente minutes.

La précision générale obtenue avec ce type d'analyses est satisfaisante : 95% au moins des ambiguïtés entières sont résolues sur l'ensemble des lignes de bases et les répétabilités sur les positions sont dans la moyenne de ce que l'on peut attendre de ce type de calcul sur un réseau national. Elles sont comprises entre 2 et 6 mm sur les composantes horizontales, quatre et dix millimètres sur la verticale pour les sessions de 24 heures ou les sessions de 3 heures avec correction de surcharge océanique. Sur la composante verticale et les sessions de 3 heures sans correction de surcharge, elles atteignent 30 mm à Brest puisqu'elles sont influencées par les variations de hauteur jusqu'à huit centimètres.

Déplacements de stations et effets de charge

Sessions de 3 heures sans correction de surcharge

Nous avons obtenus des séries temporelles longues de trois cents jours que nous pouvons utiliser pour la détection des effets de surcharge océanique. Un exemple des variations de position sur les trois composantes et pendant une douzaine de jours est donné par la figure B.7.2, pour le calcul en sessions de 3 heures sans correction de marée.

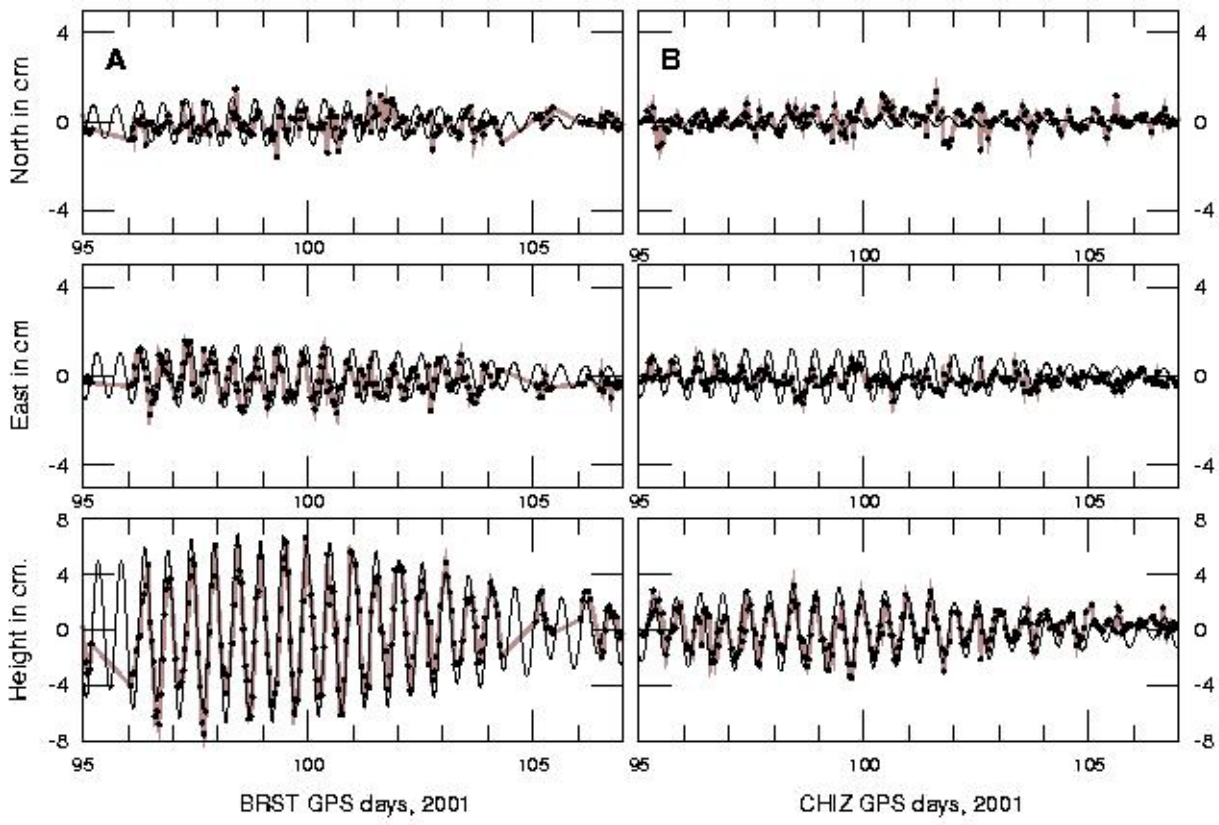


***figure B.7.2** : A : extrait de série temporelle GPS sur Brest, Nord Est hauteur, B : idem sur Chizé. Comparaison avec le modèle de surcharge CSR4.0*

On constate une bonne corrélation entre les prédictions du modèle et les variations des positions de stations effectivement mesurées par GPS. La mesure des effets de surcharge donne de bons résultats sur les composantes verticales où l'amplitude des effets de marée est supérieure à 2 cm, et sur les composantes horizontales lorsqu'elle dépasse 1,5 cm. L'accord avec le modèle est bon en ce qui concerne l'amplitude sur les composantes verticales et horizontales, aussi bien à Brest qu'à Chizé et Biarritz.

Au Mans, où l'amplitude de surcharge est suffisante pour être détectée, du moins en théorie, la précision obtenue (répétabilités de 6 mm sur la planimétrie, plus de 10 mm sur la verticale) n'est pas assez bonne pour une mesure effective des variations liées à la marée. Il n'y a pas de décalage de phase apparent entre les variations mesurées et celle prédites, sauf sur la composante Est à Brest. Ces résultats sont confirmés par une analyse de Fourier des séries temporelles obtenues par le calcul en sessions de 3 heures, sans modèles de marée.

Le spectre en fréquence permet de retrouver les harmoniques principales du signal de marée tel que décrit par les modèles : on mesure très nettement le pic correspondant à l'onde M2 (12 h 25 min), mais aussi à l'onde S2 (12 h 00) et, de manière indiscernable, aux deux termes N2 et K2 (12 h 40 et 12 h 58). L'amplitude des ondes mesurées par GPS est comprise entre 65 et 85% de celle prédite par les modèles, en fonction du site et de la composante considérée.

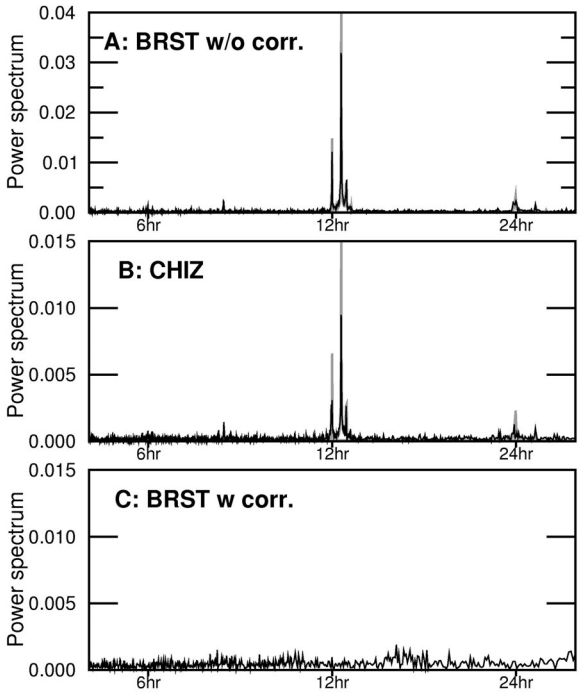


figure B.7.3 *: spectre de Fourier sur les composantes verticales,*
Brest sans correction de marée (A), Chizé (B) et Brest (C) avec correction de marée.

On retrouve quantitativement le décalage de phase sur la composante Est à Brest, entre les observations GPS et les prédictions : le signal GPS présente une avance de 2h 35 min (soit 75° de décalage en phase) par rapport aux variations des modèles. L'explication de ce phénomène est probablement à chercher du côté des modèles (effet local oublié ou lissé par les grilles de résolution insuffisante), mais ceux-ci montrent une remarquable cohérence sur les phases, quelles que soient les composantes et les stations. Il faudrait donc un effet oublié de la même manière par tous les modèles examinés pour justifier un tel décalage.

Sessions de 3 heures, avec correction de surcharge

On se pose ici la question de l'efficacité de l'application d'une correction de surcharge océanique provenant de l'un des modèles existants dans le logiciel GPS. Les séries temporelles issues des sessions de 3 heures incluant une telle correction ne montrent plus de variation périodique apparente. Le spectre en fréquence sur la composante verticale, à Brest, là où l'effet de charge est le plus fort, permet de confirmer cette impression (voir figure B.7.3C). On ne détecte plus de pic en fréquence correspondant à l'une des harmoniques de marée, au seuil du bruit des séries temporelles. L'utilisation d'un modèle de marée est donc suffisante pour éliminer les effets de la surcharge océanique, même sur des sessions aussi courtes que 3 heures où cet effet atteint 5 à 10 cm.

Variations verticales et troposphère

La question se pose à peu près de la même manière en ce qui concerne un calcul en sessions de 24 heures, comme ce qui est pratiqué couramment non seulement pour le calcul scientifique (géodynamique) mais pour les réseaux GPS permanents servant à établir les références nationales ou européennes. Les périodes propres de signaux de marées qui ont une amplitude détectable sont toutes voisines de douze ou 24 heures.

Un calcul en sessions de 24 heures ne devrait y voir qu'un effet moyen négligeable. Plus précisément, le seul effet parasite auquel on peut s'attendre est un repliement de spectre dû au léger décalage entre les périodes du signal (12 h 25 min) et un diviseur de 24 [LAMBERT et al 98]. Cet artefact ne devrait pas excéder 3 mm à Brest, sur la composante verticale, avec une période proche de quinze jours. On peut vérifier en utilisant l'analyse spectrale que les séries temporelles issues des sessions à 24 heures, sans correction de marée, ne présentent pas de signal résiduel détectable.

Par ailleurs, on peut se poser la question de l'influence d'une variation sur la verticale (de plusieurs centimètres) sur le retard troposphérique zénithal (ZTD). Une étude théorique [SANTERRE 91] a montré que les corrélations entre variations de hauteurs de station et ZTD ne sont pas nulles : une partie d'une variation de hauteur au sol non mesurée se retrouve dans une variation parasite de la longueur du trajet satellite - station, projetée sur le zénith. Santerre [SANTERRE 91] a calculé de manière théorique la proportion de variation d'altitude reversée sur le ZTD, et obtient des valeurs comprises entre 0,18 et 0,35 en fonction de la latitude du réseau GPS considéré et de l'angle de coupure en élévation des satellites (tableau B.7.2, ci-dessous).

tableau B.7.2 *: coefficient de proportion entre variation de hauteur et de ZTD* [SANTERRE 91]

	Polaire	*Moyen*	*Equatorial*
20°	0,258	0,386	0,386
10°	0,153	0,238	0,239

Depuis, plusieurs études expérimentales ont été effectuées, utilisant par exemple les variations sur la verticale dues aux marées océaniques. Sur l'Ile de Vancouver, [DRAGERT et al 00] obtiennent des coefficients de proportion de 0,18 avec un angle de coupure de 10°. Un réseau situé autour des côtes antarctiques, toujours avec une élévation descendant jusqu'à 10° donne des valeurs comprises entre 0,19 et 0,26 selon les stations [DACH et al 0].

Sur l'ouest de la France, [VEY et al 02] ont obtenu un coefficient moyen de 0,23. Ceci ne concerne que les variations de hauteurs qui ne sont pas mesurées par le GPS, comme c'est le cas des surcharges océaniques sur des sessions de 24 heures.

Un examen des variations du ZTD obtenu lors d'un calcul sans correction de marée devrait donc permettre de vérifier deux choses : avec des sessions de 3 heures, si la variation de hauteur due à la marée est correctement mesurée, elle ne doit pas influencer le ZTD ; avec des sessions de 24 heures par contre, étant simplement moyennée sur l'intervalle de mesure, elle devrait se reporter à hauteur de 25% environ sur le ZTD qui est évalué, lui, toutes les trente minutes.

La quantité que nous avons analysée ici n'est pas directement la variation de ZTD en fonction du temps. En effet, celle-ci est dominée par des variations rapides, non périodiques, dont l'amplitude peut dépasser 10 cm sur 24 heures, et qui empêchent la détection d'effets périodiques de moindre amplitude. Nous avons donc, pour les sessions à 24 heures comme pour celles à 3 heures, éliminé ces effets en soustrayant aux variations du ZTD sans correction de surcharge celles du ZTD obtenu avec correction de surcharge. L'analyse de cette différence pour les sessions de 3 heures ne montre aucun effet périodique proche des harmoniques de marée. Pour les sessions de 24 heures, un extrait des séries temporelles obtenues sur Brest est donné par la figure B.7.4, ainsi que l'analyse spectrale qui en découle.

On retrouve ainsi, dans les variations du retard troposphérique zénithal, un terme parasite directement proportionnel aux déplacements verticaux liés à la surcharge océanique (coefficient de proportion égal ici à 0,29) et comprenant les quatre fréquences principales de signaux de marée (M2, S2, N2 et K2).

Ces effets sont donc à prendre en compte dans des calculs en sessions de 24 heures, dès lors qu'on s'intéresse aux évaluations de paramètres troposphériques. Lors de calculs GPS pour le suivi météorologique, et le calcul de contenu atmosphérique en vapeur d'eau par exemple, il est impératif d'inclure une correction de surcharge océanique dans l'inversion GPS : les effets de charge non modélisés peuvent introduire des biais allant jusqu'à 2 cm sur le ZTD à Brest (soit environ 4,5 mm de vapeur d'eau précipitable).

Inversement, sur des sessions de quelques heures, une variation de la verticale suffisamment échantillonnée sera correctement mesurée et sera décorrélée des variations du retard troposphérique. Les ZTD seront donc correctement évalués au cours du calcul. Une erreur à ne pas commettre consisterait à utiliser des sessions de 24 heures pour évaluer des ZTD (donc parasités par les variations sur la verticale, comme on vient de le voir) qui seraient ensuite re-injectés sans re-évaluation dans une session de 3 heures : mieux vaut évaluer directement les ZTD au cours de la session de 3 heures.

Dans tous les cas, un calcul GPS pour d'autres objectifs que la mesure des effets de surcharge océanique a tout avantage à incorporer une correction de marée dans l'inversion GPS. On a vu que les modèles disponibles suffisaient, en précision, pour éliminer tous les effets parasites au seuil de détection du GPS.

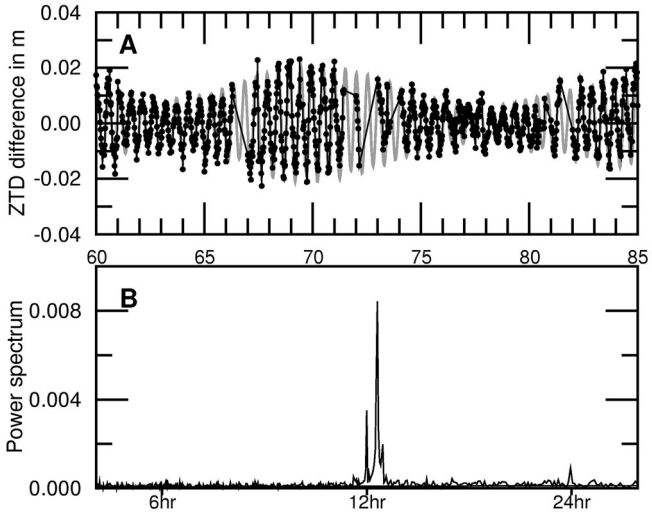


figure B.7.4

Variation de la différence de ZTD estimé sur 24 heures
sans et avec modèle de surcharge (A) et son spectre de Fourier (B).

Conclusion

Cette étude présentait un exemple d'utilisation de réseau GPS permanent (ici le RGP) pour la détection d'un effet géophysique d'amplitude relativement importante (quelques centimètres) et de période inférieure à 24 heures. L'intérêt de disposer de séries temporelles continues sur le long terme est de pouvoir en dériver amplitude et phase des différentes harmoniques présentes de manière précise. Les observations GPS montrent ici un bon accord en amplitude avec les prédictions des modèles courants (de 60 à 85% de l'amplitude des variations prédites sont mesurées). Par contre, un décalage de phase est observé sur la composante Est de la station de Brest située dans une zone de marée particulièrement complexe. Ce décalage a été évalué précisément à 2 h 35.

On a démontré ici la sensibilité de l'outil GPS à des variations de 2 à 3 cm sur la composante verticale et des périodes de quelques heures. Les cabinets de géomètres équipés de récepteurs GPS et utilisant les données du RGP comme station de référence devraient de plus en plus tenir compte des effets de marée océanique : sur une ligne de base de 100 à 200 km et une durée de 2 à 3 heures, l'effet différentiel sur la verticale atteint deux centimètres, effet qui peut se traduire par un biais.

La solution consiste, dans tous les cas, à introduire une correction de surcharge océanique dans le calcul GPS, facilité qui est maintenant proposée par tous les logiciels scientifiques. Les modèles actuels de marée sont suffisants en précision, même sur les zones complexes comme l'Ouest de la Bretagne, pour éliminer les effets de surcharge sur la verticale.

Enfin, on confirme ici la corrélation entre les variations de hauteurs non correctement mesurées (par exemple, ici, moyennées sur 24 heures) et les retards troposphériques évalués au cours du calcul GPS. À Brest par exemple, un calcul en sessions de 24 heures sans correction de marée océanique se traduit par une variation troposphérique parasite de plus de 2 cm, soit bien au delà du seuil théorique actuel de précision du GPS utilisé pour la météorologie. Une fois de plus, l'introduction de corrections de marées dans le logiciel GPS est le moyen le plus simple de s'affranchir d'artefacts sur les paramètres troposphériques évalués.

Références

[BOS, SCHERNECK] M.S. Bos and H.G. Scherneck : *Ocean loading provider, Internet site,* http://www.oso.chalmers.se/~loading.

[DACH, DIETRICH 00] R. Dach and R. Dietrich : *Influence of the ocean loading effect on GPS derived precipitable water vapor,* in Geophys. Res. Lett., 27, 2953-2956, 2000.

[DRAGERT at al 00] F. Dragert, T.S. James and A. Lambert : *Ocean loading corrections for continuous GPS : A case study at the Canadian coastal site Holberg,* in Geophys. Res. Lett., 27, 2045-2048, 2000.

[EANES, SCHULER 99] R.J. Eanes and A. Schuler : *An improved global ocean tide model from TOPEX/Poseïdon altimetry : CSR4.O,* in EGS, 24th General Assembly, The Hague (NL), 1999.

[EGBERT et al 94] G.D. Egbert, A.F. Bennett & M.G.G. Foreman : *TOPEX/Poseïdon tides estimated using a global inverse model,* in J. Geophys. Res., 99(C12), 24,821-24,852, 1994.

[KING, BOCK 01] R.W. King and Y. Bock : *Documentation for the GAMIT GPS software analysis,* release 10.05, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego (USA), 2001.

[LAMBERT et al 98] A. Lambert, S.D. Pagiatakis, A.P. Billyard and H. Dragert : *Improved ocean tide loading corrections for gravity and displacement : Canada and North United States,* in J. Geophys. Res., 103, 30231-30244, 1998.

[LE PROVOST et al 98] C. Le Provost, L. Lyard, J. Kolines, M. Genco and F. Rabilloud : *A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter derived dataset*, in J. Geophys. Res., 103(C3), 5513-5529, 1998.

[LEFEVRE et al 00] F. Lefevre, F.H. Lyard and C. Le Provost : *FES98 : A new global tide finite element solution independent of altimetry,* in Geophys. Res. Lett., 27(17), 2717-2720, 2000.

[LLUBES et al 01] M. Llubes, N. Florsch, M. Amalvict, J. Hinderer, M.-F. Lalancette, D. Orseau & B. Simon : *Observation gravimétriques des surcharges océaniques : premières expériences en Bretagne,* in C.R. Acad. Sci., Series IIa, vol. 332, 77-82, 2001.

[RAY 99] R. Ray : *A global ocean tide model from T/P altimetry : GOT99.2,* in NASA Technical Memorandum, NASA/TM-1999-209478, National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 1999.

[SAASTAMOINEN 72] J. Saastamoinen : *Atmospheric corrections for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, The Use of Artificial Satellites for Geodesy,* in Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, edited by S.W. Henriksen et al., 251-274, American Geophysical Union, Washington DC, 1972.

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

[VEY et al 02] S. Vey, E. Calais, M. Llubes, N. Florsch, G. Wöppelmann, J. Hinderer, M. Amalvict, M.F. Lalancette, B. Simon, F. Duquenne and J.S. Haase : *GPS Measurements of Ocean Loading and its Impact on Zenith Tropospheric Delay Estimates: a Case Study in Brittany, France,* in Journal of Geodesy, sous presse, 2002.

Publications

[ALTAMIMI et al 02] Z. Altamimi, P. Sillard, & C. Boucher, ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications, J. Geophys. Res., laboratoire LAREG, IGN/ENSG, sous presse, 2002.

[BOUIN et al 01] M.-N. Bouin, M. Llubes and N. Florsch : *Determination of ocean loading effects using a GPS permanent network in France,* European Geophysical Society XXVII General Assembly, poster presentation, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 2001.

B.8 Contribution de la télémétrie laser à la nouvelle représentation du système de référence terrestre et à la géodynamique

David Coulot[1,2], Joëlle Nicolas[2] et Pierre Exertier[2]

[1] *IGN/ENSG/laboratoire LAREG, Marne-la-Vallée (77)*
[2] *Observatoire de la Côte d'Azur/CERGA, Équipe Géodésie et Mécanique Céleste, Grasse (06)*

Introduction

La mise en évidence de tout phénomène physique par l'expérience nécessite de disposer d'observations. L'utilisation de ces observations pose alors un problème métrologique : la connaissance de la référence à laquelle elles sont rapportées. La géodésie en est une bonne illustration puisque cette science repose, en grande partie, sur l'analyse de mesures diverses pour laquelle la notion de système de référence est cruciale. Elle l'est d'autant plus que la représentation de ce système (le repère de référence) n'est jamais parfaite. Aussi, cette représentation doit évoluer en fonction des progrès réalisés dans différents domaines : techniques d'observations, méthodes d'analyse de données …

À l'heure actuelle, le Repère de Référence Terrestre International (ITRF), réalisation d'un système de référence lié à la Terre, est déterminé sous la forme d'un jeu de coordonnées de stations terrestres (positions et vitesses) à une époque donnée. En 1999, le Service International de la Rotation de la Terre (IERS) a lancé une expérience pilote visant à l'adoption d'une nouvelle représentation du système de référence terrestre par séries temporelles de positions de stations. Cette problématique actuelle a donné lieu au sujet de thèse de D. Coulot qui a pour objet la détermination et l'analyse d'une telle réalisation à partir de la technique de télémétrie laser sur satellites. Il doit également aboutir à la mise en place d'outils pour assurer la pérennité du calcul de ce repère dans les années à venir.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre la cellule « systèmes de référence » du laboratoire LAREG (regroupant Z. Altamimi & P. Sillard) et l'équipe de Géodésie et Mécanique Céleste (GMC) du CERGA (dirigée par P. Exertier). Le but du présent article est d'en exposer les finalités ainsi que les premiers axes de réflexion.

Après avoir présenté les enjeux de ce sujet de thèse ainsi que les caractéristiques de la technique de télémétrie laser, nous aborderons les différentes méthodes envisageables. Nous décrirons enfin de manière prospective une méthode d'analyse (à partir de simulations, pour l'instant) actuellement en cours de développement.

Enjeux

La nouvelle représentation du système de référence terrestre doit permettre une meilleure appréhension de la physique des phénomènes régissant le mouvement des stations terrestres (mouvements du géocentre, effets de charge, rebond post-glaciaire, etc). Ces phénomènes géodynamiques sont encore relativement mal connus au niveau de précision des mesures géodésiques.

À l'heure actuelle, les techniques de géodésie spatiale permettent en effet un positionnement centimétrique, voire sub-centimétrique, des stations d'observations. Certaines d'entre elles ont la capacité de fournir des mesures de positions d'instruments de manière quasi-continue. C'est le cas des techniques GPS et DORIS. La représentation « classique » par un jeu unique de coordonnées (positions et vitesses) à une époque donnée n'est donc plus satisfaisante. On ne peut en effet plus limiter, même au niveau de plusieurs millimètres (voire du centimètre), le mouvement d'un point du repère à une vitesse tectonique constante : il existe en effet des variations saisonnières, des variations inter-annuelles, etc. qui affectent non seulement chaque point du repère mais aussi ses degrés de liberté (translations et rotations).

Certains modèles géophysiques, dont des modèles d'effets de charge permettent déjà de rendre compte d'une part importante de ces variations qui s'ajoutent à la tectonique, sur des échelles spatiales et temporelles plus ou moins grandes. De ce point de vue, il reste encore de nombreux enjeux dans l'étude des déformations de notre planète avec les techniques de géodésie spatiale, enjeux auxquels sont d'ailleurs consacrés des travaux récents basés sur la technique GPS tels que [BOUIN 99].

L'un de ces enjeux est de déterminer, technique par technique, le processus de calculs - voire d'observations - à mettre en place afin de permettre une détermination sous la forme de séries temporelles, complète et la moins dégradée possible, des mouvements affectant le repère. Cette nouvelle représentation permet de déterminer à nouveau ce repère de référence dans un processus incluant la prise en compte des paramètres de rotation de la Terre (coordonnées du pôle et temps universel). En effet, bien qu'issus de calculs similaires de géodésie spatiale, le repère de référence terrestre et les paramètres de rotation de la Terre sont encore déterminés de façon indépendante, ce qui engendre inévitablement des incohérences.

Les phénomènes géodynamiques à l'origine du mouvement des stations terrestres (marées polaire et terrestres, effets de surcharges atmosphérique et océanique, rebond post-glaciaire, tectonique des plaques, « accidents » locaux...) présentent une grande variété d'amplitudes (de quelques mm pour les effets de surcharge à quelques dizaines de cm pour les marées terrestres) et de temps caractéristiques (de quelques heures à des milliers d'années). Leur estimation exhaustive (en dehors d'effets très locaux) constitue un enjeu en termes d'exactitude et d'échantillonnage pour les séries temporelles.

Il faudra aussi être vigilant quant à la nature des signaux observés tant pour les positions des stations que pour les paramètres globaux du repère (et notamment son origine, le géocentre). Ceci est essentiel pour discriminer les différents phénomènes géodynamiques et pour identifier un bruit ou un artefact résultant de la méthode de détermination des séries temporelles. De plus, un calcul reposant sur un ajustement en réseau libre et l'utilisation de projections caractéristiques de l'effet de système de référence tel qu'il a été défini dans [SILLARD, BOUCHER 01] permettrait d'assurer la définition du repère de référence sous-jacent à ces séries de positions, indépendamment de la stratégie adoptée.

Enfin, compte tenu de l'aspect continu de ces séries, les critères « classiques » de qualité statistique doivent nécessairement être ré-envisagés dans le cadre d'une théorie des processus stochastiques. C'est dans cette voie que des recherches sont actuellement menées au laboratoire LAREG [CHAPSAL 01] et [SILLARD 01a].

Concernant la télémétrie laser, l'enjeu est de revoir, au moins en partie, les processus d'estimation de positions de stations et de paramètres de rotation de la Terre en prenant en compte les spécificités de cette technique par rapport aux techniques radio-électriques DORIS et/ou GPS.

Caractéristiques de la technique de télémétrie laser

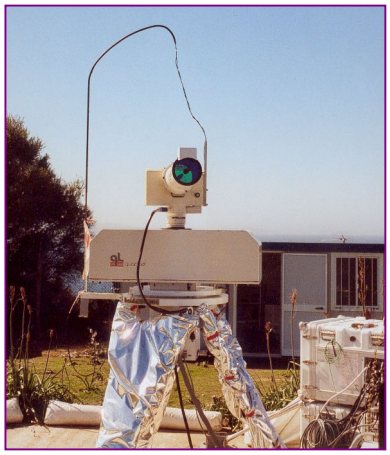
L'apport de la technique de télémétrie laser sur satellites à la construction du repère de référence repose, en grande partie, sur la dynamique du mouvement des satellites géodésiques LAGEOS, situés à environ un rayon terrestre d'altitude. Cette particularité, par rapport à la technique VLBI à caractère « cinématique » et de type « céleste » ou par rapport à la télémétrie sur la Lune à caractère « dynamique » et de type « système solaire », en fait une technique hybride. Elle reste dépendante de l'étude de mouvements orbitaux, tout comme la technique DORIS, mais avec des satellites sept à huit fois plus élevés.

Cette technique est basée sur la mesure du temps de vol aller-retour d'une impulsion lumineuse entre une station terrestre et un satellite muni d'un (ou plusieurs) rétro-réflecteur(s) renvoyant la lumière dans la direction incidente (voir figure B.8.1, ci-dessous).

Ce lien optique la rend très peu sensible à la traversée de l'ionosphère et à la composante humide de la troposphère. Ceci autorise *a priori* une meilleure détermination du positionnement vertical des stations que les techniques radio-électriques qui se trouvent être plus limitées par la traversée de l'atmosphère.

Cette traversée reste néanmoins une source d'inexactitude (quelques millimètres) des mesures laser dont il faudra faire le bilan précis [NICOLAS 00]. En revanche, ce lien optique rend la technique très dépendante des conditions météorologiques puisqu'il est impossible d'observer lorsque la couverture nuageuse est trop importante, ce qui n'est pas le cas pour les techniques radio.

les trois stations laser du site de Calern de l'OCA



la Station Laser Ultra Mobile à Ajaccio (2002)

***figure B.8.1** : de gauche à droite, la Station Laser Ultra Mobile, la Station Laser Satellites fixe et la Station Laser Lune*

La télémétrie laser est une technique dont l'historique remonte au milieu des années 1970 (LAGEOS-1 a été lancé en 1976). On peut donc disposer de 20 à 25 ans de mesures sur certains satellites, ce qui est capital pour la détermination des séries temporelles et leur analyse en vue de mettre en évidence des phénomènes à longue période. Mais l'analyse doit tenir compte du fait que plus on remonte dans le temps, plus les données se dégradent, à la fois en qualité et en quantité, voire aussi en matière de connaissance des paramètres géodésiques locaux (rattachements, déplacements des instruments, changements d'instrumentation et d'étalonnages instrumentaux, etc).

L'avantage d'une série temporelle, par rapport à la représentation « classique » positions-vitesses, est de pouvoir exprimer en permanence (dans le temps) la corrélation entre la qualité des mesures et celle des produits. On sait en effet que la qualité des données s'améliore avec le temps.

Le réseau mondial de stations laser présente une répartition spatiale hétérogène puisque les stations sont clairement concentrées dans l'hémisphère Nord (voir figure B.8.2). L'utilisation de stations mobiles telles que la Station Laser Ultra Mobile française (voir figure B.8.1) doit permettre de pallier ce défaut de répartition en densifiant le réseau temporairement et localement [NICOLAS 00]. La mise en fonction de la station d'Hartebeesthoek (Afrique du Sud), l'amélioration des mesures de la station de Tahiti ainsi que la prochaine mise en service de la station de Concepciõn (Amérique du Sud) par la NASA, vont dans le sens d'une meilleure répartition des stations.

Mais ce réseau est également hétérogène en terme de qualité des stations, qualité estimée régulièrement par le Service International de la Télémétrie Laser (ILRS) sur la base de critères précis (nombre et précision des observations, par exemple). Cette hétérogénéité concerne aussi les erreurs instrumentales systématiques (les « biais en distance ») variables selon les stations. Les instruments d'observations évoluant au cours du temps et certaines erreurs échappant au système d'étalonnage interne, ces biais peuvent présenter, pour une même station, des instabilités plus ou moins importantes (leurs stabilités à court et long terme sont également des critères de qualité pour l'ILRS).

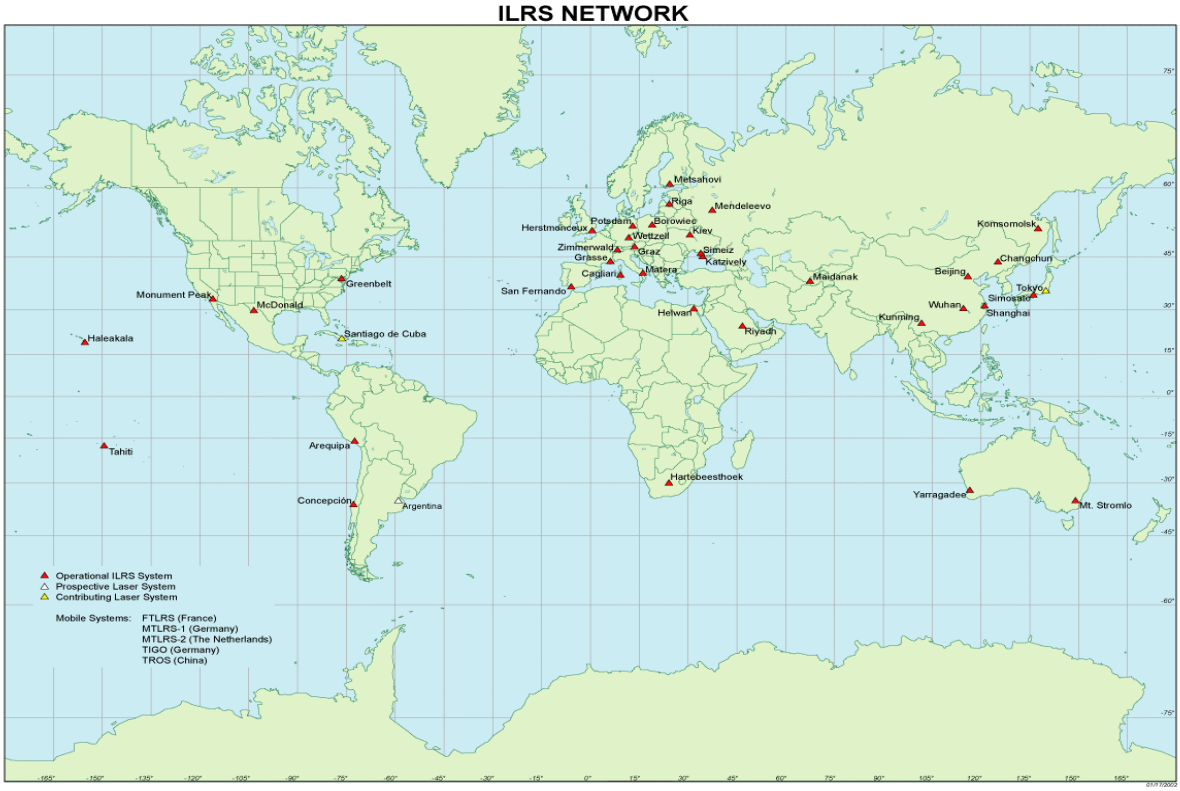


figure B.8.2 *: Le réseau international de stations laser.*
(carte tirée du site http://ilrs.gsfc.nasa.gov*)*

La répartition géométrique des rétro-réflecteurs laser sur les satellites, leur taille, leur qualité ainsi que leur réponse aux photons incidents engendrent une erreur appelée « signature du satellite ». C'est un facteur limitatif de l'exactitude et de la précision des mesures, facteur qui ne peut plus être négligé aujourd'hui [NICOLAS 00].

Comme l'illustre la figure B.8.3 (page suivante), la constellation de satellites laser présente des orbites variées en inclinaison et en altitude. Elle comporte des satellites passifs (STELLA, STARLETTE, LAGEOS, AJISAI, GFZ, ETALON) qui, de par leur forme sphérique, sont moins sensibles aux effets des forces non gravitationnelles. Ils permettent, entre autres, des déterminations précises des coefficients du champ de gravité et de leurs variations temporelles pour les premiers degrés ainsi que de la constante fondamentale GM.

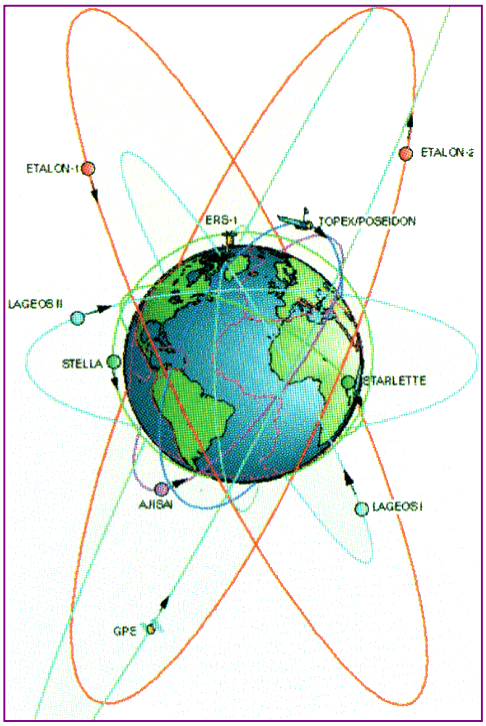


figure B.8.3 *: extrait de la constellation de satellites observés par télémétrie laser*

La télémétrie laser est une technique privilégiée pour la détermination du facteur d'échelle du repère de référence et celle de la position du géocentre avec une meilleure exactitude que les techniques radio-électriques ne le permettent. Enfin, les satellites LAGEOS, moins sensibles aux accidents du champ de gravité de par leur altitude (environ 6 000 km), constituent des cibles privilégiées pour le positionnement des stations laser.

En complément des satellites LAGEOS, le service international ILRS a suggéré, il y a un peu plus d'un an, une campagne d'observations sur les satellites géodésiques passifs ETALON (voir figure B.8.3), d'altitude beaucoup plus importante (environ 20 000 km). Les premières analyses de ces données pour le repère de référence laser et les paramètres de rotation de la Terre semblent cependant montrer un faible apport [LUCERI et al 02]. On peut envisager l'utilisation de satellites plus bas tels que STELLA et STARLETTE (environ 800 km d'altitude). En effet, les modèles de champ de gravité ont été fortement améliorés à la fin des années 1990 [BIANCALE et al 00] et le seront encore avec des missions telles que CHAMP, GRACE et GOCE.

La dépendance de la télémétrie laser vis-à-vis des conditions météorologiques, alliée à la répartition hétérogène des stations de son réseau, est à l'origine d'une répartition spatio-temporelle des observations qui a incontestablement des conséquences sur la stratégie de calcul qu'il faudra adopter pour le repère de référence terrestre laser.

Différentes stratégies de calcul

Compte tenu de ce qui précède, il existe un effet de réseau lié principalement aux répartitions spatiale et temporelle des mesures utilisées. Nous illustrons, ici, cette notion d'« effet de réseau » après avoir présenté très brièvement les différentes méthodes de calcul existantes dont nous envisageons l'utilisation.

Différentes méthodes de calcul

On peut tout d'abord envisager l'utilisation d'une méthode de calcul géométrique dans laquelle le satellite est considéré comme une cible mobile et qui est, dans son principe, une généralisation de la triangulation classique. Cette méthode est très dépendante de la qualité de l'orbite utilisée. On peut ainsi craindre que les erreurs orbitales ne se répercutent directement sur les paramètres estimés (positions de stations et paramètres de rotation de la Terre), erreurs dépendant du temps et systématismes dépendant de la géographie dits « erreurs géographiquement corrélées ». L'utilisation d'une constellation d'altitude élevée pallie en grande partie ces problèmes.

La figure B.8.4 est un exemple de séries temporelles de variations d'altitudes pour différents continents. Ces calculs ont été menés à Grasse à partir des logiciels GINS (orbites) et CALTIM (solutions) de façon géométrique. Ces séries sont issues de l'analyse des observations acquises sur les satellites LAGEOS-1 et -2 ces cinq dernières années (courbes noire LA1 et rouge LA2) et d'une analyse combinant les mesures sur ces deux satellites (courbe bleue LA1+2). L'échantillonnage de ces séries est mensuel avec une précision inférieure à cinq millimètres pour chaque détermination.

Les valeurs correspondent à des écarts de position par rapport à l'ITRF2000, après correction de la tectonique des plaques, des marées terrestres ainsi que de la marée polaire selon les standards IERS96 [MC CARTHY 96].

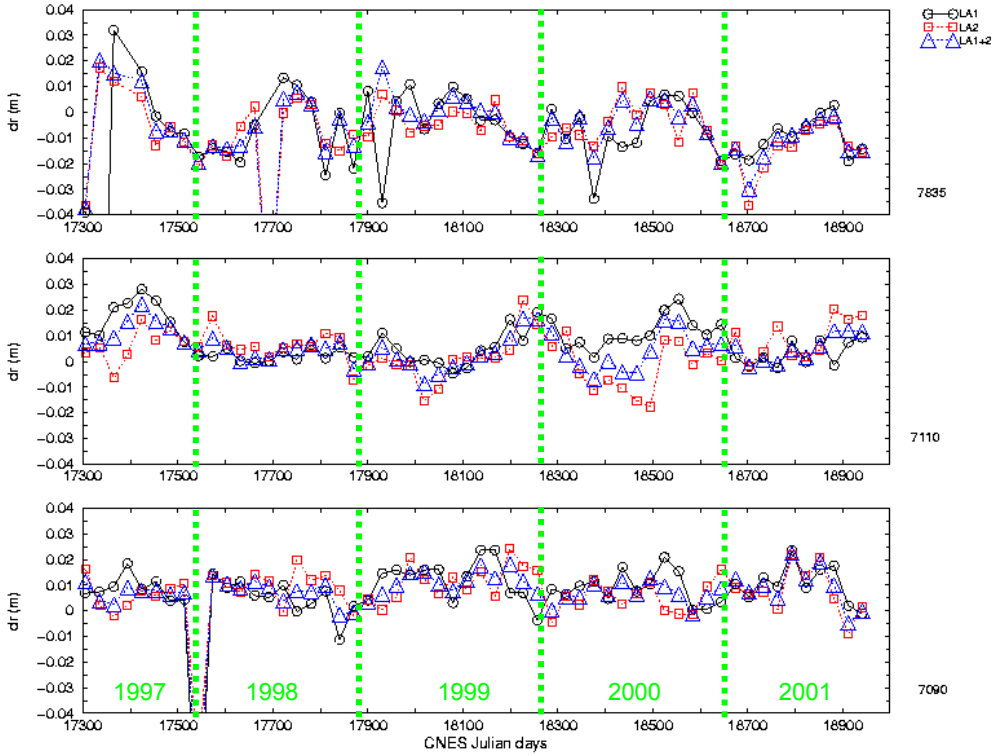


figure B.8.4 *: séries temporelles de variations d'altitude par rapport à l'ITRF2000 (unité : mètre), pour les stations 7835 (Grasse, France), 7110 (Monument Peak, USA) et 7090 (Yarragadee, Australie).*

Ces séries montrent des variations périodiques d'une amplitude maximale de deux centimètres, environ. Ces variations peuvent être attribuées à des effets de surcharges atmosphérique, océanique et d'eau continentale (neige, humidité des sols, nappes phréatiques…).

La période de calcul des séries temporelles (un mois) suppose l'« écrasement » de signaux à plus courte période et donc, certainement, la présence d'artefacts de calcul. C'est l'un des problèmes de la technique laser par rapport à la technique GPS (positionnement à la journée). Il est nécessaire de trouver un équilibre entre période de disponibilité des mesures, nombre de paramètres à estimer, qualité de ces estimations et périodes des phénomènes géodynamiques en jeu afin d'éviter un tel « lissage » des signaux à mettre en évidence.

On peut envisager ensuite une approche de type dynamique. Celle-ci permet une certaine remise en cause de l'orbite par l'estimation de paramètres caractéristiques (bulletin initial, coefficients de modèles...). Mais le grand nombre de paramètres estimables peut parfois entraîner une diffusion aléatoire d'erreurs et des corrélations artificielles entre ces paramètres. De telles méthodes de calcul ont permis, néanmoins, de déterminer les modèles combinés « repère de référence et potentiel de gravité » de la série GRIM-5 [BIANCALE et al 00].

On peut envisager enfin une méthode intermédiaire, dite « par arcs courts ». Elle permet de prendre en compte une orbite préliminaire et d'estimer des corrections orbitales à partir de mesures laser sur des arcs dits « courts » (un dixième de la trajectoire environ). Une approche de ce type a été développée au CERGA au milieu des années 1990 pour l'étalonnage des altimètres de satellites comme TOPEX/POSEÏDON pour lequel il est nécessaire de connaître précisément la composante radiale d'orbite [BONNEFOND et al 95] au-dessus d'un site géographique précis, dit de calibration de l'altimètre radar.

Les corrections estimées représentant les erreurs d'orbite locales (liées principalement à la dynamique orbitale - erreurs du repère de référence incluses - et aux biais des mesures de poursuite). Si l'on envisage l'utilisation de satellites bas comme STELLA et STARLETTE pour ajouter des équations d'observations pour le repère de référence, il faudra une méthode susceptible d'améliorer l'orbite en même temps, au moins localement. On pourra donc tester cette approche par rapport à un calcul purement dynamique.

Différentes dans leurs principes, ces méthodes ont néanmoins un point commun : la nécessité de déterminer l'orbite du satellite. L'exemple suivant met en évidence une inexactitude d'orbite liée au choix du réseau de poursuite.

Exemple d'effet de réseau

Dans cet exemple, nous avons calculé l'orbite du satellite LAGEOS-1 sur une même période (printemps 1997) à partir de deux réseaux de poursuite laser différents décrits dans le tableau B.8.1.

tableau B.8.1 *: les deux réseaux de poursuite utilisés*

Réseau 1	Réseau 2
Haleakala (Hawaii)	Haleakala (Hawaii)
Monument Peak (États-Unis)	Monument Peak (États-Unis)
Mc Donald (États-Unis)	Mc Donald (États-Unis)
Greenbelt (États-Unis)	Greenbelt (États-Unis)
Herstmonceux (Grande-Bretagne)	Herstmonceux (Grande-Bretagne)
Graz (Autriche)	Graz (Autriche)
Grasse (France)	
Zimmerwald (Suisse)	
Postdam (Allemagne)	
Wettzell (Allemagne)	
Matera (Italie)	
Mont Stromlo (Australie)	

Comme on peut le constater dans ce tableau et à l'aide de la carte B.8.2, les différences entre les deux réseaux de poursuite sont le nombre de stations considérées et l'utilisation (ou non) des mesures laser de la seule station de l'hémisphère Sud considérée, à savoir Mont Stromlo en Australie. En effectuant alors la différence entre les deux orbites ainsi calculées dans le système de coordonnées (Radial Transverse Normal) et en projetant ces différences le long de la trace du satellite sur la surface terrestre, on obtient la carte B.8.5.

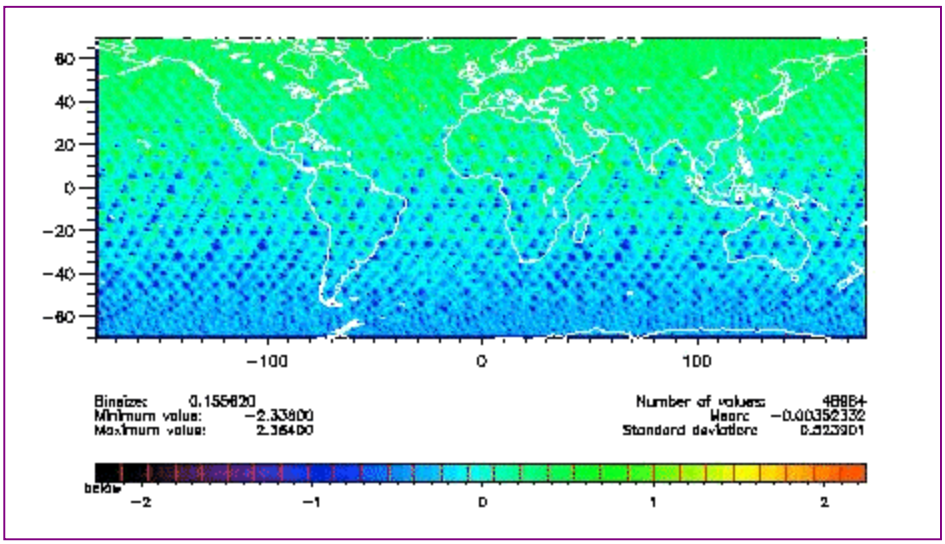


figure B.8.5 *: différences radiales d'orbite projetées sur la surface terrestre (unité : centimètre)*

Cette carte correspond à cinquante jours d'orbite de LAGEOS-1 (durée raisonnable pour obtenir une bonne couverture de la surface terrestre). Elle montre clairement une structure spatiale Nord/Sud très certainement liée à la présence ou à l'absence de la station de Mont Stromlo dans le réseau utilisé. L'inexactitude maximale d'orbite engendrée par la différence entre les deux réseaux sur la période considérée est de 2,3 cm environ en valeur absolue. La dispersion de ces inexactitudes, quant à elle, est de 5 mm. Cette valeur corrobore le niveau d'instabilité de la composante Nord-Sud de la contribution de la télémétrie laser à la définition du centre de l'ITRF2000 [ALTAMIMI et al 02].

On peut d'ores et déjà envisager d'autres effets liés au réseau de poursuite laser. Si l'on base notre calcul d'orbite sur les observations d'un réseau constitué des meilleures stations selon le classement de l'ILRS, en cas d'incident pour l'une de ces stations, c'est la qualité de toute l'orbite qui pourra être dégradée. De plus, comment doit-on envisager la gestion des biais en distance sur les mesures des stations ? Faut-il les estimer et, dans ce cas, selon quel mode (une estimation par passage, par mois ou une estimation annuelle) ? S'ils ne sont pas estimés, quelles seront les conséquences sur les déterminations des orbites et des séries temporelles, et donc sur le repère de référence ?

Pour étudier des effets de réseau potentiels tels que celui présenté ici en exemple, et plus encore, définir la stratégie de calcul à adopter pour déterminer les séries temporelles de positions de stations laser et de paramètres de rotation de la Terre, nous avons choisi de développer un outil de simulation : le logiciel MATLO (MAThématiques pour la Localisation et l'Orbitographie).

Outil de simulation MATLO

Le but de cette dernière partie est de donner une description prospective des buts de l'outil de simulation que sera MATLO ainsi que des axes de recherche qui lui sont liés. Pour ce faire, il est nécessaire au préalable de définir quelques notions importantes.

Définitions importantes

Deux types de paramètres sont à distinguer dans le cadre de ces simulations et, plus largement, dans le cadre de la détermination des séries temporelles nous concernant.

Tout d'abord, les paramètres internes sont les paramètres estimables, à savoir, les positions des stations laser, les coordonnées du pôle terrestre, le temps universel ou la durée du jour, ainsi que les biais en distance des stations. Dans le cadre d'études géodynamiques basées sur les séries temporelles, on peut également envisager d'estimer des paramètres caractéristiques des modèles (tels que les nombres de Love). Enfin, dans le cas d'utilisation d'une méthode de calcul dynamique, il faut envisager des paramètres comme le bulletin initial du satellite (position et vitesse), des coefficients empiriques correctifs des modèles de forces, des coefficients de ces modèles de forces, des paramètres atmosphériques, etc.

Ensuite, il faut considérer des paramètres externes qui sont en réalité toutes les caractéristiques de la technique laser et, plus particulièrement du réseau de poursuite (répartition spatiale des stations, hétérogénéités qualitatives, répartition spatio-temporelle des observations, etc) ainsi que la méthode de calcul elle-même (purement géométrique, dynamique ou semi-dynamique par arcs courts).

MATLO permettra de déterminer les paramètres externes autorisant la meilleure estimation des paramètres internes, et ce sur la base de trois analyses reposant sur les notions de sensibilité, d'imprécision et d'inexactitude.

La sensibilité désigne la signature d'un paramètre interne dans une grandeur observable (mesure laser, dans le cas présent), dans une grandeur servant de base au calcul de ces paramètres (orbite de satellite, par exemple) ou dans toute autre grandeur susceptible de constituer un indicateur de sensibilité. L'imprécision désigne l'écart-type d'une erreur aléatoire de moyenne nulle affectant les grandeurs observables comme les paramètres internes.

Enfin, l'inexactitude désigne une erreur systématique sur une grandeur observable ou sur un paramètre interne. C'est la moyenne de l'erreur aléatoire affectant ces grandeurs (moyenne qui, pour des grandeurs exactes, est nulle).

Buts de MATLO

MATLO devra avant tout être un outil d'aide à la décision permettant de choisir les meilleurs paramètres externes pour obtenir l'estimation la plus satisfaisante en termes de précision, d'exactitude et d'échantillonnage des paramètres internes.

Pour ce faire, nous proposons d'effectuer les trois études précédemment évoquées : une analyse de sensibilités, une analyse des imprécisions et une analyse de propagation des inexactitudes. Elles reposent sur la *simulation* de mesures laser à partir de simulations d'orbites, de mouvements de stations, de la traversée de l'atmosphère et de toutes les erreurs (systématiques ou aléatoires) affectant les dites mesures.

Analyse de sensibilités

L'analyse de sensibilités permettra de définir les paramètres externes maximisant la signature des paramètres internes dans les mesures laser. Cette étude reposera sur une formulation analytique de la distance « station-satellite » s'appuyant sur les positions de la station et du satellite exprimées dans un même repère.

La fonction de sensibilité S d'une grandeur m à un paramètre x sera définie par :

$$S(x) = m(...,x_0 + dx,...) - m(...,x_0,...)$$

x_0 désignant une valeur nominale du paramètre x et dx une perturbation de ce paramètre. Il faudra bien entendu mesurer l'influence des choix de x_0 et de dx sur les valeurs de S.

Analyse des imprécisions

L'analyse des imprécisions permettra de déterminer a priori la précision à attendre sur les paramètres internes ainsi que les corrélations entre ces derniers. Il faut remarquer qu'il ne sera nullement nécessaire de restituer les paramètres internes.

En effet, l'estimation des paramètres étant effectuée par la méthode des moindres carrés, leur matrice de variance-covariance n'est autre que l'inverse de la matrice normale du système de compensation [SILLARD 01b]. Il suffit ainsi de déterminer des matrices normales et de les inverser.

Cette étude va donc nécessiter l'obtention de dérivées partielles des fonctions de mesures par rapport aux paramètres internes. On pourra utiliser les dérivées partielles de la formulation analytique des fonctions de mesure par rapport aux positions des stations et des satellites. Cela impliquera la détermination des dérivées partielles de ces mêmes positions par rapport à des paramètres géodynamiques et orbitaux. Enfin, pour obtenir des matrices de poids réalistes des observations simulées, il faudra effectuer un bilan des sources d'imprécision sur les positions des stations, l'orbite des satellites ainsi que les mesures elles-mêmes (traversée de l'atmosphère entre autres).

Analyse de propagation des inexactitudes

L'analyse de propagation des inexactitudes permettra enfin d'étudier cette propagation entre les observables et les paramètres internes restitués. Là encore, nous nous appuierons sur la formulation analytique des distances « station-satellite ».

Tout comme le bilan des sources d'imprécisions, il faudra effectuer une étude similaire pour identifier les sources d'inexactitudes sur les positions des stations, l'orbite des satellites et les mesures laser elles-mêmes. À l'inverse de la précédente analyse, il faudra ici inverser les inexactitudes sur les mesures laser pour en déduire les inexactitudes sur les paramètres internes.

L'étude de la prise en compte (ou de la non prise en compte) des biais en distance caractéristiques de la technique de télémétrie laser devra bien entendu être menée lors de cette analyse.

Remarques

Les trois études précédentes devront être menées de front. En effet, un maximum de sensibilité à un paramètre donné peut également correspondre à une imprécision, voire à une inexactitude maximales sur la détermination de ce paramètre.

Il est clair que les imprécisions et les inexactitudes qui seront déterminées au cours de ces différentes études varieront au cours du temps. Les grandeurs qu'elles caractériseront pourront de ce fait être considérées comme des processus stochastiques. Il est donc indispensable de placer nos simulations dans ce cadre statistique précis qui nous permettra, de plus, de prendre en compte des erreurs purement aléatoires, voire des phénomènes non modélisables de façon déterministe.

Les matrices de variance-covariance déterminées par l'analyse des imprécisions pourront être la base d'études statistiques diverses. Une première analyse reposant sur l'effet de système de référence nous permettra d'extraire la matrice de variance-covariance relative aux sept degrés de liberté du repère de référence sans le déterminer. On peut également envisager d'utiliser une méthode d'analyse des composantes de la variance en vue d'identifier la structure des imprécisions sur les paramètres internes. Ces méthodes sont explicitées dans [SILLARD 99].

Enfin, la notion de constance, traditionnellement associée à celle de biais, « perdue » du fait de la variation temporelle des inexactitudes pourra être retrouvée mais en termes d'erreurs géographiquement corrélées projetées sur la surface terrestre. Les biais ne seront alors plus temporels mais bien spatiaux, ce qui nous intéresse au plus haut point dans le cadre de la détermination d'un repère de référence.

Axes de recherche associés

Concernant le calcul des inexactitudes et des imprécisions sur les orbites des satellites, on utilisera la méthode analytique de détermination du mouvement orbital circulaire perturbé au premier ordre développée par l'équipe GMC, il y a quelques années, dans le cadre de l'analyse d'erreurs en géodésie spatiale [EXERTIER, BONNEFOND 97]. Cette méthode permet en effet d'obtenir les perturbations orbitales sous forme de séries de Fourier dont les coefficients sont linéairement liés aux coefficients du modèle du potentiel considéré.

Ainsi, à partir d'une matrice de variance-covariance des coefficients du modèle et de différences entre deux modèles de ces coefficients, on peut respectivement déduire les imprécisions et les inexactitudes sur les perturbations orbitales. Ces inexactitudes peuvent alors donner lieu, en projection sur la surface terrestre, à des erreurs géographiquement corrélées.

La méthode analytique pourrait également être utilisée pour simuler directement l'orbite des satellites. Il faudrait dans ce cas envisager la prise en compte d'ordres supérieurs (au moins de l'ordre deux) car si le premier ordre est suffisant pour le calcul d'erreurs, ce n'est plus le cas pour la détermination d'un mouvement orbital. À ce titre, il faudrait également prévoir la prise en compte d'une excentricité de mouvement. Plusieurs tentatives ont d'ailleurs déjà été menées [BREITER, BOIS 94] [COULOT 00] et elles doivent être poursuivies. Concernant cette simulation des mouvements orbitaux, on peut également envisager d'utiliser la solution des équations de Lagrange en éléments non singuliers en excentricité présentée dans [DELEFLIE et al 02].

Pour la détermination du mouvement orbital, l'intégration numérique reste néanmoins reine. On se propose ainsi de développer un intégrateur numérique reposant sur l'utilisation d'une méthode de circularisation. Les méthodes d'intégration numérique classiques (Cowell, Adams-Moulton, Adams-Bashforth, etc) reposent sur l'utilisation des différences finies et donc sur des approximations polynomiales des fonctions considérées : elles permettent d'intégrer exactement des fonctions polynômes.

Leur application aux équations de la mécanique céleste dont les solutions contiennent des termes périodiques peut être source d'instabilités. Une modification des coefficients de ces méthodes pour rendre exacte l'intégration de fonctions circulaires permet de supprimer ces erreurs [BETTIS 70]. Il faut étudier l'impact d'une telle approche sur la détermination des mouvements orbitaux. Cet intégrateur numérique devra permettre l'obtention de dérivées partielles de la position du satellite par rapport à des paramètres orbitaux à partir des équations de variation.

Concernant la simulation du mouvement géodynamique des stations, des travaux déjà effectués dans ce domaine, comme [BARREDA, RODRIGUEZ 00], doivent être repris et complétés. Cette étude sera l'occasion de bien comprendre les hypothèses sous-tendant les modèles géodynamiques actuels et, éventuellement, de les remettre en cause.

Enfin, la simulation de la traversée de l'atmosphère sera l'occasion de s'intéresser à des axes de recherche actuels dans ce domaine (prise en compte des gradients horizontaux de température et de pression [ABSHIRE, GARDNER 85], remise en cause des hypothèses de symétrie de la réfraction et d'équilibre hydrostatique, élaboration de nouvelles théories [YATSENKO 95], etc). Ceci devra permettre une meilleure appréhension des délais atmosphériques et la réduction des inexactitudes qu'elles engendrent sur les mesures.

Conclusion

La détermination de séries temporelles de positions de stations laser et de paramètres de rotation de la Terre avec une précision, une exactitude et un échantillonnage fins oblige à tirer le meilleur parti des caractéristiques (forces et faiblesses) de la technique de télémétrie laser sur satellites (et notamment de son réseau de poursuite) ainsi que des méthodes de calcul de géodésie spatiale existantes. Vu ces enjeux, il est indispensable de se doter d'un outil d'analyse fiable permettant de définir judicieusement la stratégie à adopter : c'est la raison de la conception du logiciel MATLO. Cette conception est source de recherches dans l'ensemble des domaines mis en jeu par la détermination d'un repère de référence, à savoir, la dynamique orbitale, la propagation des ondes dans l'atmosphère, la géodynamique et les analyses statistiques.

Cette approche, utilisant des simulations comme aides à la décision dans les calculs de géodésie spatiale, devra être poussée encore plus loin. Il faudra pouvoir tirer parti de ce potentiel en envisageant son extension à d'autres types de mesures (autres techniques de géodésie spatiale comme DORIS, GPS, VLBI et GALILEO, mesures temps/fréquence ou mesures gravimétriques) pour nous placer de manière prospective dans l'un des enjeux de la géodésie spatiale à venir, à savoir la combinaison des techniques d'observation de la Terre pour une meilleure étude de ses déformations.

Enfin, dans cette optique prospective, alors que des missions telles que NEIGE [BARRIOT et al 01] et TIPO [SAMAIN 02] sont envisagées vers la planète Mars, il est judicieux de ne pas se limiter à la seule planète bleue. MATLO doit donc être, d'ores et déjà, conçu avec une ouverture suffisante pour permettre, dans l'avenir, de telles études prospectives. Ce travail de thèse et nos futures recherches seront autant de contributions à ces sujets actuels.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes avec lesquelles nous avons entrepris ces premiers travaux : P. Sillard et Z. Altamimi (laboratoire LAREG), sur les aspects touchant au système de référence (logiciel CATREF du laboratoire LAREG) et toutes les études statistiques, P. Bonnefond (OCA) pour la maîtrise de la technique de télémétrie laser et ses applications (logiciel CALTIM du CERGA), F. Deleflie et G. Métris (OCA) pour les aspects touchant à la dynamique orbitale, O. Laurain et P. Bério (OCA), J.-M. Lemoine et J.-C. Marty (CNES), ainsi que S. Loyer (Noveltis) pour les aspects informatiques (logiciels GINS/DYNAMO du CNES), A.-M. Gontier (Observatoire de Paris) pour la transformation entre les repères inertiels et instantanés, l'équipe laser de l'OCA avec laquelle nous participons aux observations avec la Station Laser Satellites fixe et la Station Laser Ultra Mobile et, enfin, M.-C. Julienne (OCA) pour la réalisation de documents scientifiques et l'organisation des missions.

Références

[ABSHIRE, GARDNER 85] J.B. Abshire & C.S. Gardner : *Atmospheric refractivity corrections in Satellite Laser Ranging.* IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. GE-23, n° 4, 414-425, 1985.

[BARREDA, RODRIGUEZ 00] A.R. de la Barreda & M.C. del Rodriguez : *Déformations verticales de la croûte terrestre. Étude des effets de marées terrestres et polaires et de charge générés par l'atmosphère et l'océan,* rapport de stage de DEA, Observatoire de Paris, juillet 2000.

[BARRIOT et al 01] J.-P. Barriot, V. Dehant, W. Folkner, J.-C. Cerisier, A. Ribes, J. Benoist, T. Van Hoolst, P. Defraigne, R. Warnant, R.A. Preston, L. Romans, S. Wu and A.W. Wernik : *The NEtlander Ionosphere and Geodesy Experiment,* in Advanced Space Research, vol. 28, n° 8, 1237-1249, 2001.

[BETTIS 70] D.G. Bettis : *Stabilization of finite difference methods of numerical integration*, in Celestial Mechanics, n° 2, 282-295, 1970.

[BIANCALE et al 00] R. Biancale, G. Balmino, J.-M. Lemoine, J.-C. Marty, B. Moynot, F. Barlier, P. Exertier, O. Laurain, P. Gegout, P. Schwintzer, C. Reigber, A. Bode, R. König, F.-H. Massmann, J.-C. Raimondo, R. Schmidt and S.Y. Zhu : *A new global Earth's gravity field model from satellite orbit perturbations : GRIM5-S1,* Geophysical Research Letters, vol. 27, n° 22, 3611-3614, 2000.

[BONNEFOND et al 95] P. Bonnefond, P. Exertier, P. Schaeffer and F. Barlier : *Satellite altimetry from a short-arc orbit technique: application to the Mediterranean,* in Journal of Geophysical Research, vol. 100, n° C12, 25 365-25 382, 1995.

[BREITER, BOIS 94] S. Breiter and E. Bois : *First-order theory of weakly eccentric orbital motion,* in Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, n° 60, 191-206, 1994.

[CHAPSAL 01] A.-C. Chapsal : *Analyse en séries temporelles de variables relatives au mouvement du pôle et à la rotation de la Terre,* mémoire de DEA de statistiques de l'Université de Rennes & ENSAI, IGN/ENSG, publication du laboratoire LAREG, série mémoire de stage, n° 16, juin 2001.

[DELEFLIE et al 02] F. Deleflie, G. Métris and P. Exertier : *An analytical solution of Lagrange planetary equations valid also for very low eccentricities,* in elestial Mechanics, 2002, soumis.

[EXERTIER, BONNEFOND 97] P. Exertier & P. Bonnefond : *Analytical solution of perturbed circular motion: application to satellite geodesy,* in Journal of Geodesy, n° 71, 149-159, 1997.

[LUCHERI et al 02] V. Luceri, R. Devoti and G. Bianco : *The contribution of Etalon I and II satellites to the Earth orientation determination,* Session « Earth's rotation, reference systems and geodynamics », EGS XVIIth General Assembly, Nice (France), 2002.

[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.

[YATSENKO 95] A.Y. Yatsenko : *Exact theory of astronomical refraction for the real atmosphere,* in Astronomy and Astrophysics Supplement Series, n° 111, 579-586, 1995.

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, IGN, ENSG/laboratoire LAREG, 2002, sous presse,

[BOUIN 99] M.-N. BOUIN : *Traitement de données GPS en Antarctique : mouvements crustaux, rebond post-glaciaire et systèmes de référence,* thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, directeur de thèse : Claude Boucher, IGN, ENSG/laboratoire LAREG, en 1999.

[COULOT 00] D. Coulot : *Étude analytique des perturbations du mouvement des satellites artificiels : origines géodynamiques,* rapport de stage de DEA, Observatoire de Paris, 13 septembre 2000

[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, ENSG/laboratoire LAREG, IGN-SR-00-001/R-ART-PS, 2001.

[SILLARD 01b] P. Sillard : *Estimation par moindres carrés,* Collection ENSG IGN, Hermès, Lavoisier, 2001.

[SILLARD 99] P. Sillard : *Modélisation des systèmes de référence terrestres. Contribution théorique et méthodologique,* thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, directeur de recherche : Claude Boucher, IGN, ENSG/laboratoire LAREG, soutenue le 12 mai 1999.

[SILLARD, BOUCHER 01] P. Sillard & C. Boucher : *A review of algebraic constraints in terrestrial reference frame datum definition,* in Journal of Geodesy, n° 75, 63-73, IGN, ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

B.9 ITRF2000

Zuheir Altamimi, Patrick Sillard & Claude Boucher

Introduction

Pour la première fois de l'histoire du Repère International de Référence Terrestre (ITRF), la combinaison ITRF2000 inclut des solutions de repères terrestres libres de toutes contraintes externes. L'approche des contraintes minimales a été utilisée dans le but de définir le système de référence sous-adjacent de manière précise. L'origine de l'ITRF2000 est définie par le centre des masses de la Terre, estimé par la technique de télémétrie laser sur satellite (SLR), son échelle est donnée par la technique VLBI et SLR. Son orientation est alignée à celle de l'ITRF97 à l'époque 1997 et l'évolution temporelle de l'orientation est alignée, conventionnellement, à celle du modèle géophysique NNR-NUVEL-1A.

L'orientation de l'ITRF2000, ainsi que son évolution temporelle, ont été réalisées en utilisant une méthode géodésique précise, ancrées sur des sites de grande qualité géodésique permettant ainsi une définition du système de référence au niveau du millimètre. C'est un repère plus dense et précis que jamais réalisé, comprenant environ huit cents stations, réparties sur à peu près cinq cents sites, ayant une meilleure répartition sur la surface du globe par rapport aux précédentes versions de l'ITRF. 50% des stations ont leur position estimée à mieux qu'un centimètre et près de cent sites ont leur vitesse estimée à mieux qu'un millimètre par an. Le champ de vitesses de l'ITRF2000 a permis d'estimer les vitesses relatives de six plaques tectoniques majeures. Une comparaison au modèle géophysique NUVEL-1A montre des différences de vitesses relatives entre plaques de 0,03° à 0,08°/Ma, équivalentes à 1-7 mm/an sur la surface de la Terre.

Les données d'entrée de l'ITRF2000

Les solutions individuelles incluses dans la combinaison ITRF2000 contiennent des positions et vitesses de stations avec matrices de variance complètes, fournies en format SINEX. Trente solutions ont ainsi été combinées : deux VLBI, une LLR, sept SLR, six GPS, deux DORIS, deux techniques multiples et neuf solutions régionales GPS.

Ces solutions ont été estimées par les centres d'analyse en introduisant l'un des trois types de contraintes suivantes :

- *contraintes que l'on peut facilement enlever* : les positions/vitesses sont contraintes à des valeurs externes avec une incertitude de l'ordre de 10^{-5} mètre pour les positions et mètre/an pour les vitesses ;
- *contraintes lâches* : les incertitudes des contraintes sont de l'ordre d'un mètre pour les positions et 10 cm/an pour les vitesses ;
- *contraintes minimales* : dont le seul but est de définir le système de référence sous-jacent en termes d'origine, échelle, orientation et évolution temporelle.

Les observations utilisées dans ces solutions couvrent une période de la vingtaine d'années pour les techniques pionnières VLBI, LLR, SLR et une dizaine d'années pour GPS et DORIS. La figure A.5.1 montre la répartition des sites de l'ITRF2000. En plus des solutions individuelles des techniques spatiales, des rattachements locaux dans les sites de colocalisation ont été introduits dans la combinaison globale de l'ITRF2000. Ces rattachements sont essentiels pour faire le lien entre les différentes techniques de mesure.

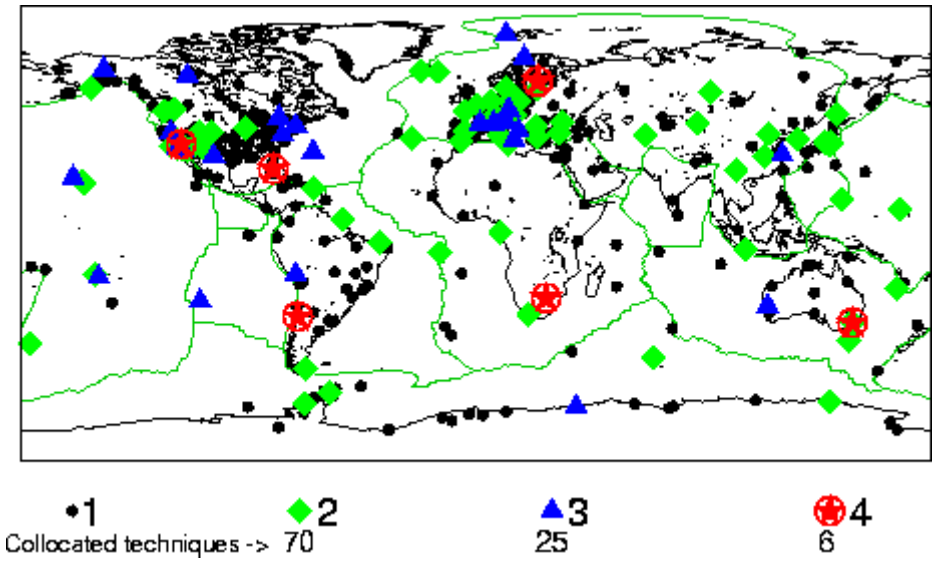


figure A.5.1 *: le réseau primaire de l'ITRF2000*

L'analyse des données de l'ITRF2000

Trois innovations majeures ont été utilisées, afin d'améliorer la combinaison ITRF2000 :

- la combinaison de solutions libres de toute contrainte externe, mais pour lesquelles des contraintes minimales ont été appliquées, afin de définir de la manière la plus précise possible, le système de référence en origine, échelle, orientation et évolution temporelle ;
- l'origine de l'ITRF2000 est le centre des masses, définie par la technique SLR ;
- pour une meilleure définition de l'évolution temporelle en orientation, celle-ci a été établie sur une sélection de sites géodésiques de très grande qualité.

Les étapes suivantes ont été adoptées dans le calcul de l'ITRF2000 :

- remplacer les contraintes externes appliquées par les centres d'analyse par des contraintes minimales ;
- propager les solutions individuelles aux époques de variance minimale ;
- combiner les solutions ainsi obtenues en y ajoutant les rattachements dans les sites de colocalisation.

Le modèle de combinaison utilisé dans le calcul de l'ITRF2000 est donné par l'équation suivante :

$$\begin{cases} X_s^i = X_c^i + (t_s^i - t0) + T_k + D_k X_c^i + R_k X_c^i + (t_s^i - t_k)[\dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i] \\ \dot{X}_s^i = \dot{X}_c^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i \end{cases}$$

où pour chaque solution individuelle *s, k,* T_k, D_k et R_k sont respectivement la translation, le facteur d'échelle et la matrice de rotation. Les paramètres pointés représentent les dérivées par rapport au temps.

La définition de l'ITRF2000

En termes de définition de système de référence, l'ITRF2000 a les caractéristiques suivantes :

- l'échelle et sa dérivée sont définies par une moyenne pondérée de celles des solutions VLBI et celles les plus en accord des solutions SLR ;
- les translations et leurs vitesses sont définies par celles des solutions SLR les plus en accord ;
- l'orientation a été alignée à celle de l'ITRF97 à l'époque 1997.0 et son évolution temporelle a été alignée à celle du modèle géophysique NNR-NUVEL-1A.

Il faut noter que l'orientation et sa dérivée ont été obtenues par une sélection de sites de grande qualité géodésique, satisfaisant les critères suivants :

- observés en continu pendant au moins trois ans ;
- situés loin des frontières des plaques tectoniques et des zones de déformation ;
- les vitesses combinées doivent être précises à mieux que 3 mm/an ;
- les résidus sur les vitesses doivent être inférieurs à 3 mm/an pour au moins trois solutions différentes.

Basée sur l'analyse de l'ITRF2000, la sélection des sites a été opérée suivant les critères ci-dessus fournissant cinquante-quatre sites à l'intérieur des plaques tectoniques et quarante et un sites dans des zones de déformation. Parmi les cinquante-quatre sites sélectionnés, cinquante seulement ont été utilisés dans l'alignement au modèle NNR-NUVEL-1A. Les quatre autres sites ont des vitesses significativement différentes du modèle.

Les résultats de l'ITRF2000

Les résultats de la combinaison globale ITRF2000 sont les positions des stations à l'époque 1997.0 et leurs vitesses de déplacement, ainsi que les paramètres de transformation entre les solutions individuelles et l'ITRF2000. Les stations appartenant à un même site ont été contraintes à avoir la même vitesse.

Étant donné que l'ITRF2000 combine des solutions ayant des contraintes minimales, les paramètres de rotation sont arbitraires. Ce constat est également applicable aux composantes des origines des solutions VLBI. Par conséquent, nous allons nous intéresser aux échelles et origines des solutions satellitaires ainsi qu'aux échelles des solutions VLBI.

Origines et échelles des solutions individuelles

En sélectionnant l'intervalle 1991-2000 comme étant la période commune des observations des solutions individuelles incluses dans l'ITRF2000, la figure A.5.2 (page 17) montre les variations linéaires des translations des solutions SLR et GPS, par rapport à l'origine ITRF2000 (définie par la moyenne de cinq solutions SLR).

La figure A.5.3, page 18, illustre les variations linéaires des échelles des solutions VLBI, SLR et GPS, par rapport à l'échelle de l'ITRF2000 (définie par la moyenne des trois solutions VLBI et cinq SLR).

La figure A.5.2, montre le très bon accord entre les solutions SLR en termes d'origine, au niveau de 5 mm, sur les trois composantes X Y Z. Les solutions GPS exhibent de larges différences et en particulier autour des axes X et Y. La figure A.5.3, page 18, montre l'accord remarquable en termes d'échelle des trois solutions VLBI. D'autre part, la plupart des solutions SLR s'accordent en échelle à 1 ppb (10^{-9}) près.

Afin d'évaluer la stabilité à long terme de l'ITRF2000, la dispersion (ou erreur moyenne quadratique pondérée) a été calculée sur les différences d'échelles et de translations des trois solutions VLBI et cinq SLR qui on été utilisées dans la définition de l'ITRF2000.

Les valeurs de dispersion sont données dans la table A.5.2 (page 18), qui montre (en terme d'erreur moyenne quadratique pondérée) que la stabilité de l'ITRF2000 sur une dizaine d'années est de l'ordre de 4 mm en origine et 0,5 ppb en échelle (équivalent à un biais).

table A.5.1 *: stabilité à long-terme de l'origine et de l'échelle de l'ITRF2000*

Paramètre/dérivée	EMQP (1997.0)	EMQP (sur 10 ans)
	Echelle	
D (ppb)	0,2 (~1,2 mm)	0,5 (3 mm)
$\dot{D}$ (ppb/an)	0,03 (~0,2 mm/an)	
	Origine	
T x (mm)	0,4	1,4
$\dot{T}$ x (mm/an)	0,1	
T y (mm)	0,5	1,5
T y (mm/an)	0,1	
Tz (mm)	0,9	3,9
$\dot{T}$ z (mm/an)	0,3	

Évaluation de la qualité de l'ITRF2000

La qualité de l'ITRF2000 dépend des qualités relatives des solutions individuelles ainsi que de la stratégie d'analyse et de combinaison appliquée à ces solutions. Un indicateur de qualité des solutions individuelles est l'erreur moyenne quadratique pondérée (EMQP) calculée pour chacune de ces solutions. Les valeurs EMQP sont données dans la table A.5.2, indiquant un niveau de 2-5 mm en position et de 1-2 mm/an en vitesse est atteint par la plupart des solutions utilisées.

Il est aussi intéressant de comparer l'ITRF2000 par rapport à l'ITRF97 en termes d'erreurs formelles, illustrées dans la figure A.5.4, page 18, à la fois en positions et vitesses. Ces erreurs formelles représentent non seulement la précision des positions et vitesses mais aussi l'exactitude de la définition de l'ITRF2000.

Le champ de vitesses des stations de l'ITRF2000

Bien que l'ITRF2000 ait été aligné sur le modèle NNR-NUVEL-1A, il est instructif de quantifier les vitesses résiduelles entre les deux. La figure A.5.5, page 19, illustre les différences de vitesses entre l'ITRF2000 et NNR-NUVEL-1A pour quarante-neuf des cinquante sites choisis, répartis sur six plaques tectoniques ayant au moins quatre sites.

Cette figure montre clairement des résidus systématiques par plaque entre les deux champs de vitesses, comme par exemple entre les plaques Eurasie et Nord Amérique, pour n'en citer que ces deux.

Ce comportement résiduel suggère qu'il y ait des différences significatives des vitesses relatives entre plaques, entre l'ITRF2000 et le modèle relatif NUVEL-1A. Cette différence est, globalement, de l'ordre de 3 mm/an. Cependant, ceci n'altère pas la qualité interne de l'ITRF2000, dans la mesure où le but de l'alignement de l'ITRF2000 au modèle est de définir uniquement l'orientation différentielle de l'ITRF2000.

Par conséquent, l'utilisateur doit être conscient que les pôles de rotation prédits par le modèle NNR-NUVEL-1A ne sont pas égaux à ceux qui pourraient être estimés à partir des vitesses ITRF2000.

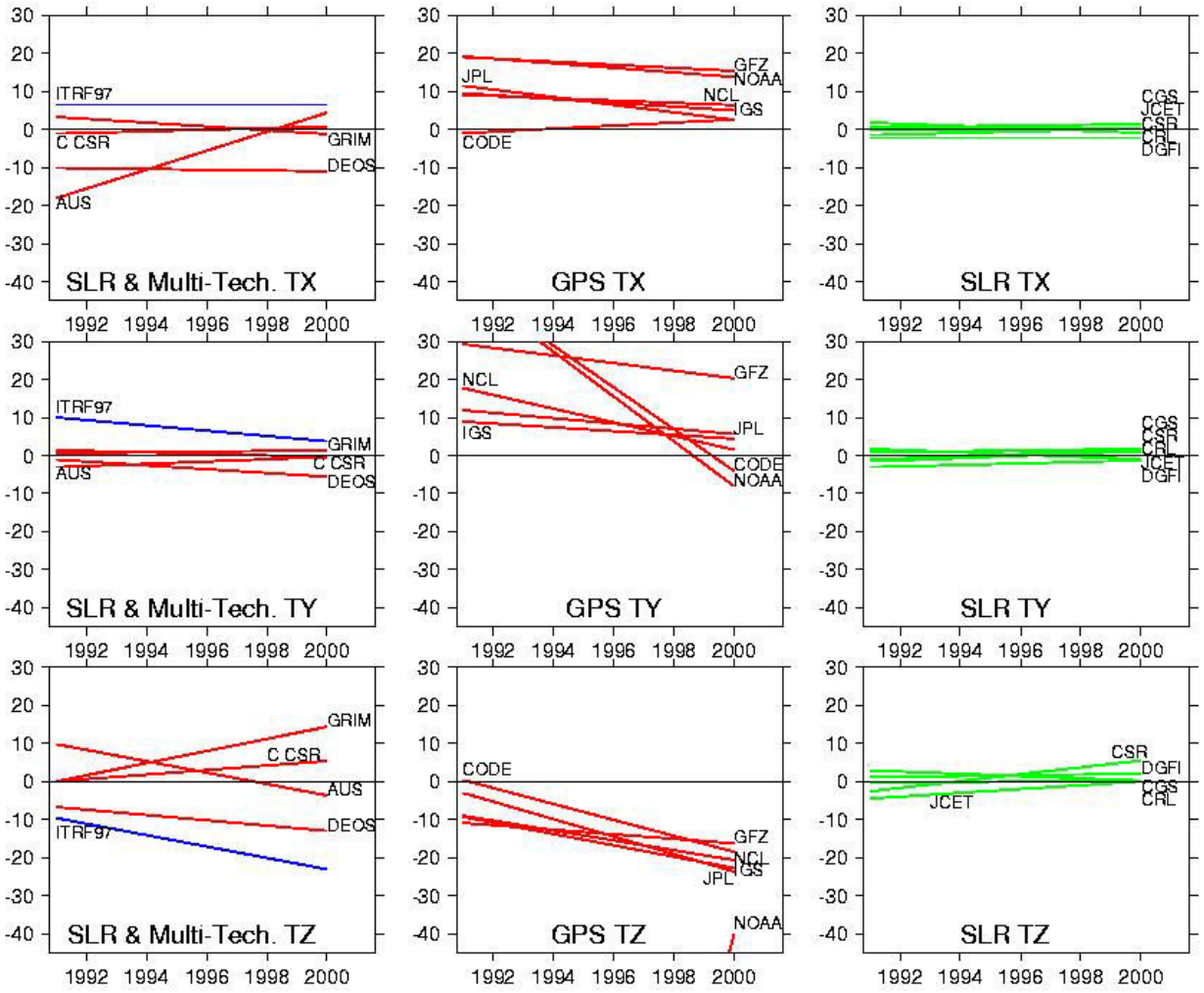


***figure A.5.2**: variations des translations des solutions individuelles incluses dans l'ITRF2000*

La figure A.5.6, page 19, montre les différences des vitesses calculées par les pôles de rotation de l'ITRF2000 d'une part, et le modèle NNR-NUVEL-1A d'autre part. De plus, un pôle de rotation estimé par l'ITRF2000 dépend des sites choisis et du niveau de rigidité de la plaque en question, alors que le modèle fournit toujours le même pôle, pour n'importe quel ensemble de sites de la plaque.

Afin d'illustrer la discussion ci-dessus, nous avons utilisé les vitesses ITRF2000 pour estimer les pôles de rotation de six plaques, données dans la table A.5.3, page suivante. Dans cette estimation, les quarante-neuf neuf sites ont été utilisés, augmentés d'un site sur la plaque Antarctique et un autre sur la plaque Pacifique pour améliorer la géométrie des sites sur ces deux plaques.

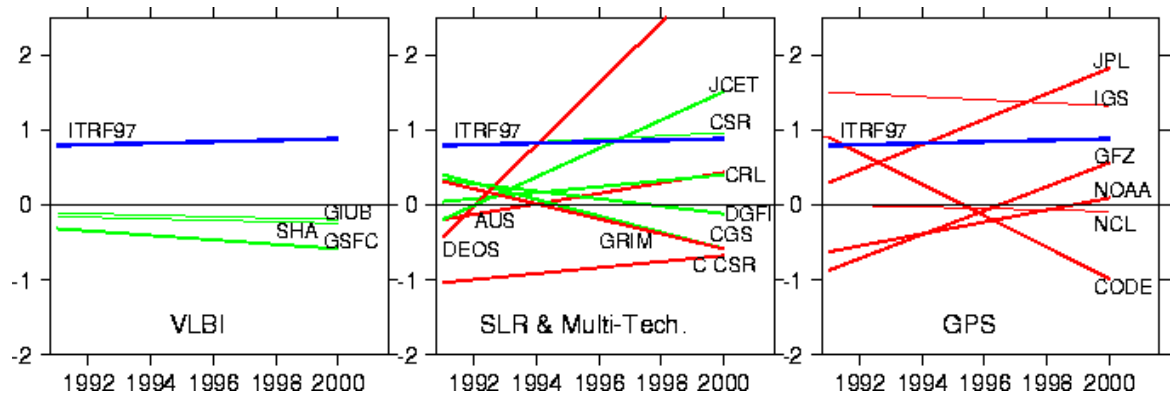


figure A.5.3 *: variations des échelles des solutions individuelles incluses dans l'ITRF2000*

Le modèle d'observation utilisé dans cette estimation est l'équation suivante, reliant le vecteur d'Euler ω_p à la vitesse du point $\dot{X}_i$ ayant X_i comme position et est situé sur la plaque *p* :

$$\dot{X}_i = \omega_p \times X_i$$

La matrice de variance complète des vitesses des cinquante et un sites, extraite de celle de l'ITRF2000, a été utilisée dans l'estimation des pôles de rotation, en un ajustement unique, préservant ainsi les corrélations entre les paramètres.

table A.5.2 *: résumé des EMQP des solutions incluses dans l'ITRF2000*

Technique	Nombre de solutions	EMQP en position (mm)	EMQP en vitesse (mm/an)
VLBI	3	2-3	1
SLR	7	2-14	1-5
GPS	6	2-5	1-2
DORIS	2	25-30	4-5
Techniques multiples	2	6-9	2
GPS Régional	9	1-8	1-4

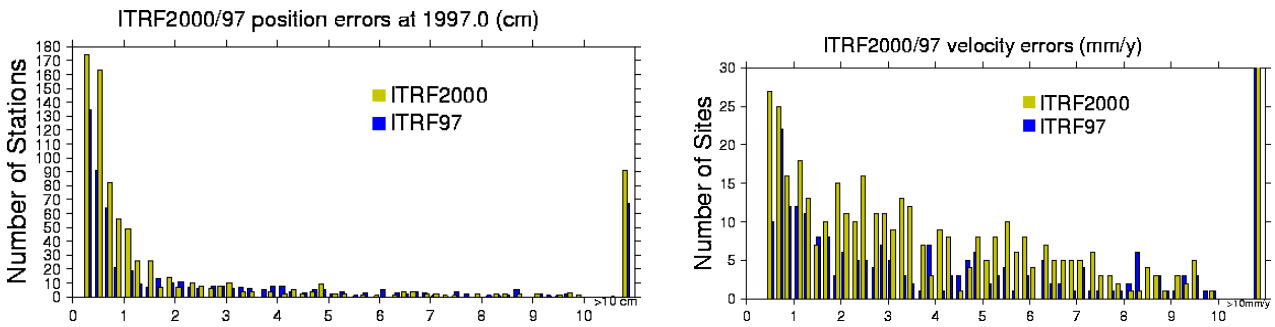


figure A.5.4 *: histogrammes des positions et vitesses des stations ITRF2000/ITRF97*

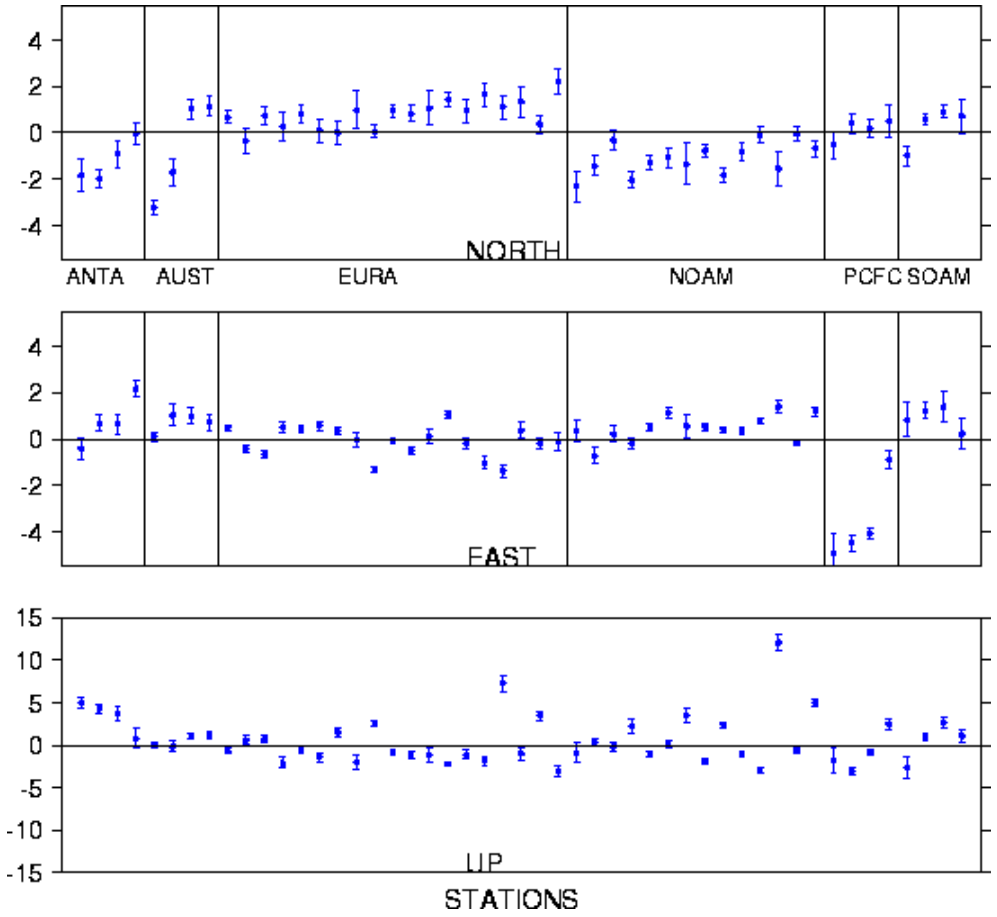


figure A.5.5 *: différences des vitesses entre l'ITRF2000 et le modèle NNR-NUVEL-1A pour quarante sites*

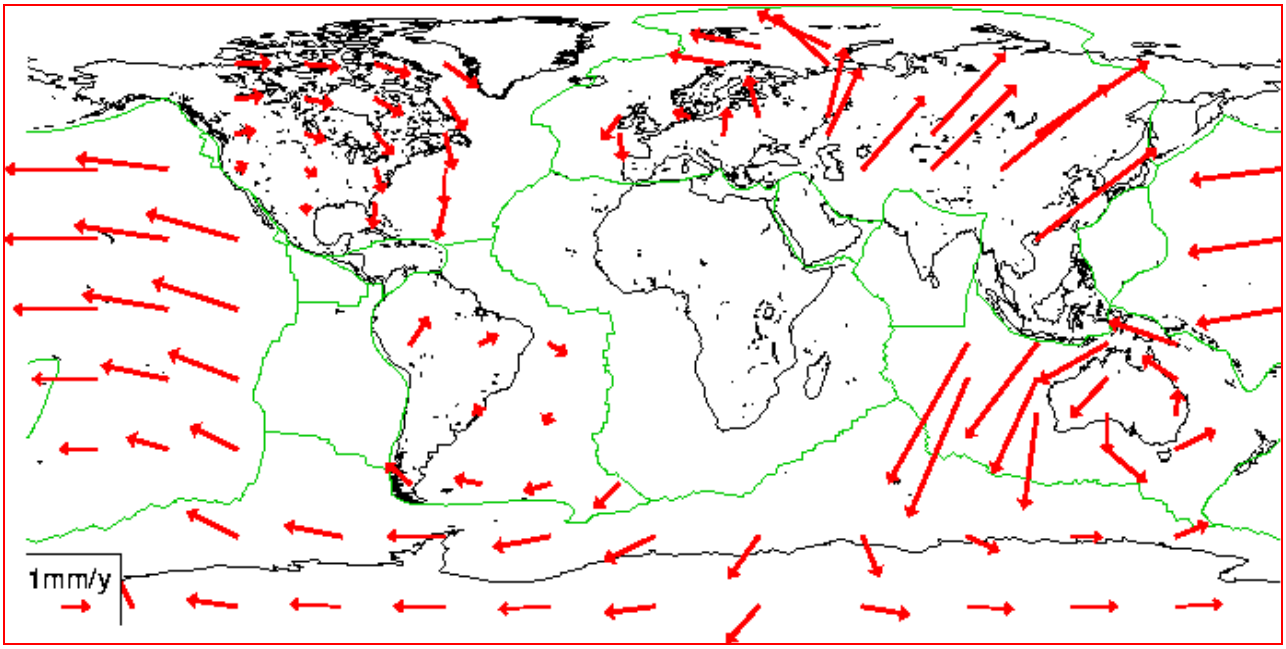


figure A.5.6

Différences des vitesses entre l'ITRF2000
et le modèle NNR-NUVEL-1A calculées à partir de leurs pôles de rotation respectifs.

table A.5.3 *: pôles des rotations de six plaques tectoniques principales de l'ITRF2000*

Plaque	ϕ (°N)	λ (°E)	ω (°/m.an)
ANTA	61,830 ±2,143	-125,574 ±3,689	0,231 ±0,015
AUST	32,327 ±0,652	39,437 ±0,816	0,614 ±0,006
EURA	57,965 ±1,211	-99,374 ±2,710	0,260 ±0,005
NOAM	-5,036 ±1,142	-83,144 ±1,945	0,194 ±0,003
ANTA	-64,176 ±0,404	110,194 ±1,345	0,666 ±0,005
AUST	-21,457 ±2,806	134,631 ±4,762	0,113 ±0,005

Le modèle de mouvement des plaques tectoniques issu de l'ITRF2000

En utilisant les six pôles absolus de rotations, des pôles relatifs ont ensuite été calculés par addition de vecteurs. Les pôles relatifs de rotation des plaques sont insensibles à la définition du système de référence. Il est donc intéressant de comparer les pôles déduits de l'ITRF2000 à ceux prédits par le modèle géophysique (voir table A.5.4, ci-dessous).

Cette table montre que les différences entre les deux modèles se situent entre 0,03° et 0,08° par million d'années, équivalent à environ 1-7 mm/an sur la surface de la Terre.

Comme le montre la table A.5.4, par rapport à la plaque Pacifique, les vitesses ITRF2000 des autres plaques sont plus rapides que celles prédites par le modèle géophysique, à l'exception de la plaque Australienne. De plus, les résultats de l'ITRF2000 montrent un mouvement relatif entre les plaques Eurasie et Nord Amérique, plus rapide que celui du modèle géophysique par environ 0,056°/million d'années.

table A.5.4 *: pôles relatifs des plaques tectoniques de l'ITRF2000*

Plaque	ϕ(°N)	λ(°E)	Ω_x	Ω_y	Ω_z	Ω	Ω_N	ΔΩ	δΩ
par rapport à la plaque Pacifique									
ANTA	65,688	-84,208	,000640	-,006305	,014029	,882	,870	,025	0,7
AUST	61,482	6,530	,008747	,001001	,016203	1,057	1,074	,054	4,9
AURA	63,118	-79,215	,001357	-,007126	,014309	,919	,859	,083	6,9
NOAM	50,488	-75,134	,002152	-,008107	,010171	,755	,749	,036	2,2
SOAM	-58,070	-85,633	-,000463	,006058	-,009749	,658	,637	,041	3,9
par rapport à la plaque Nord Américaine									
EURA	73,032	128,99	-,000794	,000981	,004138	,248	,214	0,56	4,6

Ω_x, Ω_y et Ω_z sont les composantes cartésiennes des pôles relatifs en radians par million d'années, Ω et Ω_N sont respectivement les pôles de l'ITRF2000 et NUVEL-1A, en degrés par million d'années, $\Delta\Omega = | \Omega - \Omega_N |$.

$\delta\Omega$ est la magnitude de la différence de vitesse en mm/an sur la surface de la Terre.

Conclusion

L'ITRF2000 est, de loin, la version ITRF la plus étendue et la plus précise jamais réalisée, Cette solution contient prés de huit cents stations réparties sur près de cinq cents sites. La cohérence interne des solutions VLBI et SLR a permis une définition précise de l'échelle et de l'origine. La stabilité à long terme de l'ITRF2000, évaluée sur une dizaine d'années, est de l'ordre de 4 mm en origine et de 0,5 ppb en échelle (environ 3 mm sur la surface de la Terre), Les résultats géophysiques de l'ITRF2000 montrent la faiblesse du modèle géophysique NUVEL-1A à décrire les mouvements relatifs actuels des plaques tectoniques estimés par la géodésie spatiale avec une précision au niveau du millimètre par an,

Références

[ARGUS, GORDON 91] D.F. Argus and R.G. Gordon : *No-Net-Rotation Model of Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model Nuvel-1,* in Geophys., Res, Lett, 18, 2038-2042, 1991.

[DEMETS et al 90] C. DeMets, R.G. Gordon, D.F. Argus and S. Stein : *Current plate motions,* in J. Geophys., in Res, 101, 425-478, 1990.

[DEMETS et al 94] C. DeMets, R.G, Gordon, D.F. Argus and S. Stein : *Effect of recent revisions of the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions,* in Geophys. Res, 21(20), 2191-2194, 1994.

[SILLARD, BOUCHER 01] P. Sillard and C. Boucher : *A Review of Algebraic Constraints in Terrestrial Reference Frame Datum Definition,* in Journal of Geodesy, vol. 75, pp. 63-73, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

Publication

[ALTAMIMI et al 01] Z. Altamimi, C; Boucher and P; Sillard : *New Trends for the Realization of the International Terrestrial Reference System*, in Adv, Space Res., IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

B.10 Géodésie physique : champ de pesanteur et nivellement, bilan d'activité 2001

Olivier Jamet & Patrick Sillard

Introduction

L'action de recherche *« Géodésie physique : champ de pesanteur et nivellement »,* ouverte cette année, comprend deux volets principaux. Le premier concerne le calcul du champ de pesanteur, avec pour objectif l'amélioration de la qualité du géoïde national et s'inscrit dans la suite des travaux d'Henri Duquenne et de Zheheng Jiang [JIANG 96], ainsi que de Pascal Willis [WILLIS 98]. Le second vise à l'amélioration des processus de calcul des réseaux de nivellement et fait suite aux travaux présentés par Patrick Sillard en 2000 [SILLARD 99].

Calcul du champ de pesanteur

Contexte et objectifs

Les calculs de géoïde (équipotentielle du champ de pesanteur correspondant au niveau moyen des mers) et de quasi-géoïde (surface permettant la conversion des hauteurs ellipsoïdales en altitudes normales) font appel à un ensemble de méthodes depuis longtemps établies, puisque leurs fondements théoriques remontent, pour les plus récentes, aux années 80 [MORITZ 89]. Si elles se sont longtemps montrées satisfaisantes, c'est en grande partie en raison de la faible exactitude, jusqu'à présent requise pour ce type de données.

L'augmentation constante de la précision du positionnement global par satellite, dont l'exactitude peut atteindre aujourd'hui le centimètre, conduit à rechercher des améliorations. Ainsi, le quasi-géoïde actuellement disponible sur la France, calculé en 1998 par Henri Duquenne, à l'École Supérieure des Géomètres Topographes, Le Mans (F), [DUQUENNE 98], est d'une exactitude moyenne de quelques centimètres, ce qui ne permet pas, par exemple, d'effectuer des mesures de nivellement par GPS sans perte de qualité.

L'amélioration de cette exactitude peut être recherchée dans trois directions :

- amélioration de la qualité des mesures de gravité utilisées ;
- réduction des approximations consenties dans les calculs ;
- mise en œuvre de stratégies nouvelles incorporant d'autres données.

La recherche entreprise cette année a pour objectif d'explorer quelques pistes dans ces deux dernières directions. L'année 2001 a été principalement consacrée à deux axes : l'évaluation de l'incidence des hypothèses statistiques sous-jacentes aux techniques dite de collocation, et l'étude de méthodes de calcul du champ de pesanteur par intégration sur la surface topographique.

Étude des hypothèses sous-jacentes à la collocation

On désigne sous le terme de collocation les techniques d'estimation de variables géodésiques par recherche du meilleur prédicteur linéaire connaissant un certain nombre d'observations ponctuelles. Dans le cas du champ de gravité, les observables seront des mesures de la gravité, de la déviation de la verticale, ou de composantes du tenseur gradiométrique, tandis que les valeurs estimées seront, par exemple : les valeurs du potentiel en tout point d'une surface, ou les composantes de ce potentiel dans une base de fonctions harmoniques.

Le problème de la détermination du potentiel étant par nature sous-déterminé, on fait appel à plusieurs hypothèses pour calculer ces estimations : d'une part, on modélise le champ de gravité lui-même comme une variable aléatoire gaussienne, afin de rendre le problème de l'estimation au maximum de vraisemblance linéaire, d'autre part, on suppose cette variable aléatoire stationnaire et ergodique afin de permettre l'estimation des covariances du champ sur les mesures effectuées.

Enfin, nous cherchons une solution de norme minimale, afin d'assurer l'unicité de la solution. Nous nous sommes intéressés aux techniques de collocation dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire de Gravimétrie et de Géodynamique de l'Institut de Physique du Globe de Paris (UMR 7096).

L'étude que nous avons conduite avait deux objectifs : le premier concernait l'amélioration de la séparation entre courtes et grandes longueurs d'ondes du champ lors des calculs de collocation. Les calculs du champ de pesanteur font intervenir des données d'origines diverses. En particulier, elle utilisent des représentations mondiales des grandes

longueurs d'onde du champ issues de données satellitaires, conjointement avec des mesures de la gravité au sol (qui intègrent toutes les longueurs d'onde du signal) et des estimateurs des courtes longueurs d'onde du champ issus des modèles numériques de terrain.

Une amélioration de la séparation des grandes longueurs d'onde permettrait une ré-estimation des représentations mondiales améliorant de fait le résultat des calculs locaux. Si les premiers résultats obtenus dans cette étude se sont révélés prometteurs [JAMET 01], ils n'ont pas été confirmés par des études plus poussées.

Le second objectif concernait l'estimation de l'incidence des hypothèses statistiques effectuées dans les calculs de collocation. Une étude sur simulation a montré que l'hypothèse de stationnarité conduisait à une modélisation statistique sous-optimale, et que la prise en compte de la non stationnarité locale du champ pouvait améliorer significativement les résultats des calculs de collocation dans le cas de la gravimétrie en mer (c'est-à-dire lorsque l'incertitude des mesures de gravité est de l'ordre de 0,5 à 1 milliGal) [JAMET, DIAMENT 02]. Dans le cas de la gravimétrie terrestre, ce phénomène n'a pas été mis en évidence en raison d'incertitudes inhérentes au protocole expérimental choisi.

Ce résultat est illustré par la figure A.5.7, page suivante, qui présente une comparaison, sur un jeu de signaux simulés, des exactitudes d'interpolation par collocation des anomalies de gravité, suivant qu'une modélisation stationnaire est ou non adoptée. Chaque point du graphique correspond à l'erreur moyenne quadratique du signal interpolé (en ordonnée) en fonction de l'exactitude des mesures de pesanteur (en abscisse). Les axes sont logarithmiques (logarithme décimal des exactitudes en mGal).

Les quatre nuages de points correspondent à quatre niveaux d'exactitude des mesures (0,05 mGal, 0,5 mGal, 1 mGal et 5 mGal). Dans le domaine d'exactitude correspondant à la gravimétrie en mer, les nuages de point issus du modèle non stationnaire se détachent clairement des résultats de l'interpolation stationnaire en montrant des erreurs d'interpolation moins élevées.

Pour les exactitudes de mesures très faibles (0,05 mGal, en bas à gauche de la figure A.5.6), les nuages sont très dispersés et ne montrent pas de différence entre les modélisations stationnaire et non stationnaire : nous attribuons ce résultat au manque de précision numérique de l'expérience. Ces résultats ont été présentés au colloque AROPA (Analytical Representation Of Potential field Anomalies for Europe), en octobre 2001 et sont en cours de publication [JAMET, DIAMENT 02].

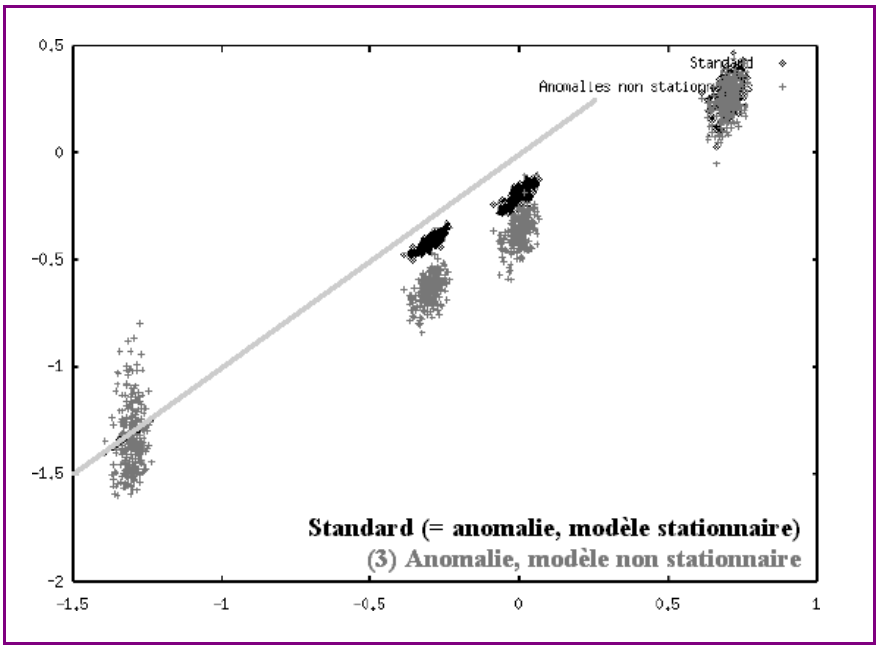


figure A.5.6

Exactitude d'interpolation de l'anomalie de gravité par collocation en fonction de l'exactitude des mesures de pesanteur (axes logarithmiques) : en noir, modèle stationnaire ; en gris, modèle non stationnaire.

Étude des méthodes intégrales

L'équation fondamentale de la géodésie, qui est à la base des méthodes intégrales usuelles telles que l'intégration de Stokes ou la méthode de Molodensky (dont on trouvera une description détaillée dans l'ouvrage de H. Moritz [MORITZ 89]), est fondée sur l'utilisation des mesures de la géodésie traditionnelle : la pesanteur est mesurée en des points repérés par leur position planimétrique et par leur *altitude*.

Les outils de la géodésie spatiale, actuellement le positionnement par satellite, et dans un proche avenir la possibilité d'obtenir des modèles numériques de terrain de plus en plus précis dans un repère orbital (c'est-à-dire des modèles numériques de *hauteurs ellipsoïdales*, et non plus d'*altitudes*) ouvrent la possibilité de nouvelles approches.

Le principe général des méthodes intégrales repose sur une propriété générale des fonctions harmoniques : il suffit de connaître les valeurs du champ de pesanteur sur une surface extérieure à la Terre pour le déterminer dans tout l'espace. Dans le cadre de la géodésie classique, cette surface doit être une équipotentielle (cas de la méthode de Stokes), ou doit être introduite comme une inconnue du problème (cas de la méthode de Molodensky).

Dans l'optique de la disponibilité de modèles numériques des hauteurs ellipsoïdales du terrain, cette surface pourrait être la surface topographique. Le champ serait alors entièrement déterminé par intégration de sa dérivée (l'accélération de la gravité) sur cette surface (la contribution de la rotation de la Terre à la pesanteur étant connue)

Une première analyse de cette approche nous a conduit à abandonner cette piste : d'une part, l'expression théorique de la solution à ce problème, que l'on peut voir comme un problème de prolongement d'une fonction harmonique à partir d'une surface quelconque, est mathématiquement non triviale. D'autre part, l'exactitude requise pour la surface topographique, dans l'optique de produire un géoïde centimétrique, est de l'ordre du centimètre, ce qui reste hors de portée des techniques de mesure envisageables aujourd'hui (même à long terme) et pose par ailleurs des difficultés de définition.

Autres activités

Parallèlement à ces recherches, le développement d'un outil de simulation des anomalies de gravité à partir d'anomalies de la densité des roches de la croûte terrestre a été entrepris. L'objectif de ce travail est de compléter l'étude de l'influence des hypothèses statistiques sur les résultats de calcul de champ.

En effet, si l'on peut tester la validité d'une partie des hypothèses sur de seuls critères de cohérence des modèles utilisés, les hypothèses de base ne peuvent être validés qu'en montrant qu'elles sont compatibles avec des hypothèses raisonnables concernant la géologie des zones étudiées.

Un logiciel de simulation du champ permettra de comparer les performances de différentes approches sur la base d'hypothèses justifiées par des arguments physiques. Cet outil est actuellement conçu sous la forme de modules permettant de calculer le potentiel, le vecteur accélération et le tenseur gradiométrique en fonction d'anomalies de densité de formes simples (prismes rectangles et sphères). L'extension à des formes plus complexes est en cours. La figure A.5.7 montre un exemple d'anomalies simulées à partir d'un ensemble aléatoire d'anomalies de densité.

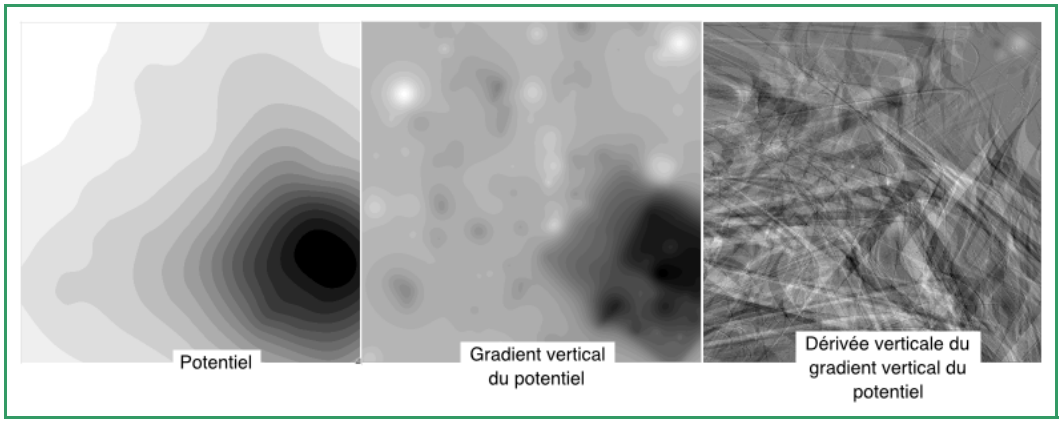


figure A.5.7
Anomalies de la pesanteur simulées à partir d'un ensemble aléatoire d'anomalies de densités.

Orientation des recherches

Compte tenu de ces résultats, les recherches sur le calcul du champ de pesanteur sont aujourd'hui principalement orientées vers l'amélioration des méthodes de collocation.

Deux axes sont privilégiés :

- *premièrement* : l'évaluation de l'incidence des hypothèses statistiques doit être complétée, principalement en ce qui concerne l'incidence des anisotropies locales du terrain sur l'exactitude des calculs, et l'adéquation du critère de régularisation utilisé (minimisation de la norme de l'anomalie) ;

- *deuxièmement* : le problème de la séparation des longueurs d'ondes du champ et de la coopération entre mesures à différentes échelle devra être approfondi, en particulier dans l'optique de l'exploitation des futures données de la gravimétrie satellitaire : nous nous orientons sur ce point vers la recherche de représentations fonctionnelles du champ adaptées aux traitements échelles multiples.

Nivellement

Le nivellement est l'une des techniques géodésiques les plus précises. Par contre, elle est sujette à « systématismes » et l'amélioration de cette technique passe par la compréhension de ceux-ci. Par ailleurs, on dispose en France de trois générations de réseaux de nivellement : le réseau Bourdaloüe (1860), le réseau NGF (début du vingtième siècle) et le réseau IGN69.

Ces trois réseaux ont en commun des cheminements qui permettent d'envisager d'étudier les déformations de territoire pour peu que l'on soit capable :

- d'analyser convenablement les modèles d'erreurs de chaque réseau ;
- de mettre en correspondance des repères observés dans chaque réseau. Pour l'instant, seul le nivellement IGN69 a été numérisé. On dispose de ré-observations sur la partie nord ouest de la France effectuées au cours des années 90.

La présente recherche vise à exploiter les données disponibles pour évaluer l'intérêt scientifique de la comparaison systématique des nivellements successifs. Un premier essai de comparaison a été effectué sur l'ouest de la France dans le cadre d'un stage d'ingénieur [BELLASTER BERNAL 01]. Actuellement, des bibliothèques d'intégration des données sont en cours de développement et les premières études de cheminements aller-retour ont montré qu'une partie des « systématismes » pouvait être identifiée à des auto-corrélations dans les dénivelées successives. Ceci permet donc d'envisager des modèles de compensation des données plus réalistes que ceux utilisés jusqu'à présent qui supposent les observations rigoureusement indépendantes.

Références

[BALLESTER BERNAL 01] C. Ballester Bernal : *Comparaison entre le réseau de nivellement IGN69 et la campagne des années 1996/98,* rapport de stage ingénieur ETSICG et T, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, mars 2001

[DUQUENNE 98] H. Duquenne : *QFG98, a new solution for the quasigeoid in France*, École Supérieure des Géomètres Topographes, le Mans(France), (http://www.esgt.cnam.fr/recherche/geoide/art_buda.pdf), 1998.

[JIANG 96] Z. Jiang : *Méthodologie moderne de la détermination du géoïde ; application à la réalisation d'une référence verticale opérationnelle : contribution au géoïde français*, thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 1996.

[MORITZ 89] H. Moritz : *Advanced Physical Geodesy*, 2 2. Wichmann, 1989.

Publications

[JAMET 01] O. Jamet : *Estimation locale de la composante régionale d'une anomalie du champ de pesanteur*, rapport de stage du DEA de Géophysique Interne de l'IPGP, Institut de Physique du Globe de Paris, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[SILLARD 99] P. Sillard : *Amélioration des processus de compensation des données de nivellement,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 71, Activité-recherche 1999, page 102-, 2000/3, IGN-SR-99-001/R-ART-PS, IGN/ENSG, laboratoire LAREG, 1999.

[WILLIS 98] P. Willis : *Détermination du géoïde,* in Bulletin d'Information de l'IGN n° 69, Activité-recherche 1997, pp. 104-116, 1998/3, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, IGN-SR97-001/R-ART-PW, 1998.

Publication 2002, citée dans le texte

[JAMET, DIAMENT 02] O. Jamet & M. Diament : *On the estimation of the spectral representations of gravity anomalies*, in Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2002 (à paraître).

C. Publications

Isabelle Melot

La liste suivante présente les références des publications issues du programme de recherche 2001. Elle reprend les références données dans les différents articles du Bulletin. Vous pouvez vous procurer les publications en libre diffusion auprès du Service de la recherche :

Service de la recherche
Institut géographique national

2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDE CEDEX

téléphone (33) 01 43 98 83 19
télécopie (33) 01 43 98 81 71

adresse électronique : isabelle.melot@ign.fr

Thèses de doctorat

[BEL HADJ ALI 01] Atef Bel Hadj Ali : *Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques : application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques,* thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, directeur de thèse : Robert Jeansoulin, spécialité : SIG, 210 pages, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-013/C-THE-ABHA, soutenue le 22 octobre 2001.

[BOFFET 01] Annabelle Boffet : *Stratégies distribuées de généralisation à base de contraintes métriques et sémantiques,* thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité : SIG, directeur de thèse : Jacques Ferber, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-014/S-THE-AB, soutenue le 13 décembre 2001.

[DE JOINVILLE 01] Olivier de Joinville : *Évaluation de la qualité d'une cartographie urbaine à l'aide d'images aériennes à haute résolution,* thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, directeur de thèse : Henri Maître, spécialité : Signal & Images, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-003/C-THE-ODJ, soutenue le 26 mars 2001.

[FUCHS 01] Frank Fuchs : *Contribution à la reconstruction du bâti en milieu urbain, à l'aide d'images aériennes stéréoscopiques à grande échelle. Étude d'une approche structurelle,* thèse de doctorat de l'Université Paris-5, René Descartes, directeurs de thèse : Georges Stamon & Hervé Le Men, discipline : Sciences de la Vie et de la matière, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-001/C-THE-FF, soutenue le 27 avril 2001.

[JUNG 01] Franck Jung : *Comparaison entre couples stéréoscopiques de dates différentes pour la détection de changements topographiques*, thèse de l'École Polytechnique, spécialité : Mathématiques Appliquées, directeur de thèse : Alain Trouvé, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-007/C-THE-FJ, soutenue le 21 novembre 2001.

[MOREL 01] Laurent Morel : *Références géodésiques pour les futures missions altimétriques : application à la mission JASON,* thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, soutenue le 3 octobre 2001.

[MUSTIÈRE 01] Sébastien Mustière : *Apprentissage supervisé pour la généralisation cartographique*, thèse de doctorat en Informatique de l'Université Pierre & Marie Curie, Paris-6, spécialité : Informatique, Intelligence Artificielle, directeurs de thèse : Jean-Gabriel Ganascia & Jean-Daniel Zucker, 241 pages, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-012/S-THE-SM, soutenue le 8 juin 2001.

Articles (journaux scientifiques)

[ALTAMIMI et al 01] Z. Altamimi, ..., M. Feissel (25 auteurs) : *The terrestrial reference frame and the dynamic Earth*, in Eos Trans. 82, pp. 273, 278-279, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[ALTAMIMI et al 01] Z. Altamimi, C. Boucher and P. Sillard : *New Trends for the Realization of the International Terrestrial Reference System,* Adv, Space Res., IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[ALTAMIMI et al 01] Z. Altamimi, P. Sillard, and C. Boucher, ITRF2000 : *A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications,* in J. Geophys. Res., in press, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[BADARD, RICHARD 01] T. Badard and D. Richard : *Using XML for the exchange of updating information between geographical information systems*, in Computers, Environment and Urban Systems (CEUS), vol. 25, Elsevier Science Ltd., Oxford, pp. 17-31, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-026/S-ART-TB, 2001.

[BADARD, SPERY 01] T. Badard & L. Spery : *Problèmes liés à l'échange et à l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques,* in IGAT Editions Hermès, France, 21 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-047/S-ART-TB, 2001.

[BOCK et al 01] O. Bock and E. Doerflinger : *Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning,* in Phys. Chem. Earth, 26, 373-383, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-005/L-ART-OB, 2001.

[BOCK et al 01] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom and J. Pelon : *Effect of small-scale atmospheric inhomogeneity on positioning accuracy with GPS,* in Geophys. Res. Lett., 28, n° 11, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-002/L-ART-OB, 2001.

[BOCK et al 01] O. Bock, J. Tarniewicz, C. Thom and M. Kasser : *Study of external path delay correction techniques for high accuracy height determination with GPS,* in Phys. Chem. Earth (A), vol. 26, n° 3, pp. 165-171, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-001/L-ART-OB, 2001.

[BONIN 01] O. Bonin : *Error simulation in road databases,* in GIM International,15, n° 3, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-043/L-ART-OB, 2001.

[BONIN 01] O. Bonin : *Grandes déviations pour des sommes pondérées de variables aléatoires i.i.d. appliquées à un problème géographique,* in C.R. Acad. Sci. Sér. I Math, t. 333, Série I, 369-372, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-027/S-ART-OB, 2001.

[BOUIN, VIGNY 01] M.-N. Bouin and C. Vigny : *New constraints on Antarctic plate motion and deformation from GPS data,* in Journal of Geophysical Research, 105 (B12), pp. 28 279-28 293, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[CALAIS 01] E. Calais : *Continuous GPS measurements across the western Alps, 1996-1998,* in Geophys. J. Int., 38, 221-230, 1999.

[CALAIS et al 01] E. Calais, R. Bayer, J. Chéry, F. Cotton, E. Doerflinger, M. Flouzat, F. Jouanne, M. Kasser, M. Laplanche, D. Maillard, J. Martinod, F. Mathieu, P. Nicolon, J.-M. Nocquet, O. Scotti, L. Serrurier, M. Tardy & C. Vigny : REGAL : *Un réseau GPS permanent dans les Alpes occidentales et leur avant-pays, premiers résultats,* in Bulletin de la Société Géologique de France, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[CALAIS et al 01] E. Calais et al : REGAL : *A permanent GPS network in the western Alps : Configuration and first results,* C.R. Acad. Sci. Ser. II, 331, 435-442, 2000.

[CALAIS et al 01] E. Calais, J.-M. Nocquet, F. Jouanne and M. Tardy : *Current strain regime in the western Alps from continuous GPS measurements, 1996-2001,* in Geology, vol. 30, 7, 651-654, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[DEHANT et al 01] V. Dehant, M. Feissel, O. De Viron, M. Yseboodt and C. Bizouard : *Excitation of the Earth's nutation by the atmosphere,* Eos Trans. AGU 82(47), Abstract G42A-10, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[FUCHS et al°01] F. Fuchs, H. Jibrini, G. Maillet, N. Paparoditis, M. Pierrot Deseilligny & F. Taillandier : *Trois approches pour la construction automatique de modèles 3-D de bâtiments en imagerie aérienne haute résolution,* in Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT), numéro spécial Journées scientifiques de l'ONERA (JSO), laboratoire MATIS, IGN-SR-01-033/C-ART-FF, 2001.

[GONTIER et al 01] A.-M. Gontier, K. Le Bail, M. Feissel, T.M. Eubanks : *Stability of the extragalactic VLBI reference frame*, in Astron. Astrophys 375, pp. 661-669, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[JUNG 01] F. Jung : *Change detection in aerial stereo pairs at different dates,* in SPIE Electronic Imaging Newsletter, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-032/C-ART-FJ, 2001.

[KASSER 01] M. Kasser : *Le GPS : utilisation en positionnement et surveillance,* in Techniques de l'ingénieur, fascicule R 1384, 8 pages, juin 2001, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[KASSER 01] M. Kasser : *Le suivi métrologique des instabilités de surface*, in Techniques de l'Industrie Minérale, n° 10, juin 2001, pp. 31-35, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[MANCHE et al 01] Y. Manche , M. Naaim & P. Berthet-Rambaud : *Analyse spatiale du risque d'avalanche basée sur l'utilisation des modèles de simulations et des systèmes d'informations,* in Revue Internationale de Géomatique, 20 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-051/S-ART-YM, 2001.

[MANCHE et al 01] Y. Manche , M. Villanova, H. Martin & R. Burnet : *Un système d'information dans le domaine des risques naturels: le projet SIRVA,* in Revue Internationale de Géomatique, 16 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-052/S-ART-YM, 2001.

[MOREL, WILLIS 01] L. Morel and P. Willis : *Parameter sensitivity of TOPEX Orbit and derived Mean Sea Level to DORIS stations coordinates, Advanced Space Research,* IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[NOCQUET et al 01] J.-M. Nocquet, E. Calais, Z. Altamimi, P. Sillard and C. Boucher : *Intraplate deformation in western Europe deduced from an analysis of the ITRF97 velocity field,* in Journal of Geophys. Res., 106 B6, pp. 11239-11257, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

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

[SILLARD, BOUCHER 01] P. Sillard & C. Boucher : *A Review of Algebraic Constraints in Terrestrial Reference Frame Datum Definition,* in Journal of Geodesy, vol. 75, pp. 63-73, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[TARNIEWICZ et al 01] J. Tarniewicz, O. Bock, J. Pelon & C. Thom : *Effect of small-scale atmospheric inhomogeneity on positioning accuracy with GPS,* in Geophys. Res. Lett., 28, n° 11, pp. 2289, IGN, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-002/L-ART-OB, 2001.

Autres articles

[BOUIN 01] M.-N. Bouin : *Étude de la flexion continentale sous la charge océanique à partir des données RGP,* Journées Recherche de l'IGN, 14-15 mars 2002, Saint-Mandé (F) & in Bulletin d'Information de l'IGN n° 73, 2002/3, Activité recherche 2001, pp.95-102, IGN (Eds), IGN/ENSG/laboratoire LAREG, IGN-SR-01-002/R-ART-MNB, 2001.

[BUCHER 01] B. Bucher : *Un environnement de conception coopérative d'utilisations de données géographiques,* Journées Recherche de l'IGN, 14-15 mars 2002, Saint-Mandé (F) & in Bulletin d'Information de l'IGN n° 73, 2002/3, Activité recherche 2001, pp.63-74, IGN (Eds), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-049/S-ART-BB, 2001.

[COULOT°01] D. Coulot : *Contribution de la télémétrie laser à la nouvelle représentation du système de référence terrestre et à la géodynamique,* Journées Recherche de l'IGN, 14-15 mars 2002, Saint-Mandé (F) & in Bulletin d'Information de l'IGN n° 73, 2002/3, Activité recherche 2001, pp.103-112, IGN (Eds), IGN/ENSG/laboratoire LAREG, IGN-SR-01-003/R-ART-DC, 2001.

[HARMEL, KASSER 01]. A. Harmel & M Kasser : *Les calculs de l'altitude du Mont-Blanc à l'IGN*, in Géomètre n° 12, décembre 2001, pp. 36-37, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[HOTTIER 01] Ph. Hottier : *Aérotriangulation analytique, GPS absolu et autres problèmes,* Journées Recherche de l'IGN, 14-15 mars 2002, Saint-Mandé (F) & in Bulletin d'Information de l'IGN n° 73, Activité recherche 2001, 2002/3, pp.49-62, IGN (Eds), laboratoire MATIS, IGN-SR-01-040/C-ART-PH, 2001.

[JAMET, SILLARD 01] O. Jamet & P. Sillard : *Géodésie Physique : champ de pesanteur et nivellement,* Action de recherche, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 73, Recherche-activité 2001, 2002/3, pp. 26 à 30, IGN (Eds), IGN-SR-01-001/R-ART-OJ, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[JUNG 01] F. Jung : *Détection de changements par comparaison de couples stéréoscopiques,* Journées Recherche de l'IGN, 14-15 mars 2002, Saint-Mandé (F) & in Bulletin d'Information de l'IGN n° 73, Activité recherche 2001, 2002/3, pp.41-48, IGN (Eds), laboratoire MATIS, IGN-SR-01-039/C-ART-FJ, 2001.

[KASSER 01] M. Kasser : *Les stations GPS permanentes en France,* fiche technique du CNIG n° 49, 8 pages, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[KASSER 01] M. Kasser : *Les systèmes RGF 93 et Lambert 93,* fiche technique du CNIG n° 50, 8 pages, IGN/ENSG/ laboratoire LAREG, 2001.

[KASSER 01] M. Kasser : *Les caméras numériques aéroportées*, in Géomètre n° 11, novembre 2001, pp. 44-45, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[KASSER 01] M. Kasser : *La numérisation des photographies aériennes,* in Géomètre, n° 11, novembre 2001, pp. 46-47, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[THOM, SOUCHON 01] Ch. Thom and J.-Ph. Souchon : *Multi-Head Digital Camera Systems,* in GIM International, vol. 15 #5, mai 2001, pp. 34-37, GITC Publication Eds 2289, 2001c, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-006/L-ART-CT, 2001.

[VIGLINO 01] J.-M. Viglino : *Un puzzle de 500.000 pièces,* in SIG la Lettre n° 25, mars 2001, IGN-SR-01-005/C-ART-JMV, 2001.

[VIGLINO 01] J.-M. Viglino : *Le Référentiel à Grande Échelle,* numéro spécial d'IGN Magazine, pp. 8-10, juillet-août 2001, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-016/C-ART-JMV, 2001.

Communications à congrès

[ALTAMIMI et al 01] Z. Altamimi, C. Boucher and P. Sillard : *Results from ITRF2000 analysis*, AGU Fall Meeting 2001, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[BARD 01] S. Bard : *La dérivation de bases de données géographiques : vers une évaluation des données géographiques après généralisation,* Conférence « Géomatique et espace rural », Journées Cassini, Montpellier (F), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-030/S-COM-SB, 2001.

[BARD, MUSTIÈRE 01] S. Bard & S. Mustière : *Revision of cartographic rule bases funded on interactive alteration analysis*, 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, pp. 2148-2159, vol. 3, (poster), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-053/S-COM-SB, 2001.

[BARILLOT et al 01] X. Barillot, J.-F. Hangouët and H. Kadri-Dahmani : *Generalisation of the Douglas and Peuker Algorithm for Cartographic Applications,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, vol. 3, pp. 2137-2146, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-032/S-COM-XB, 2001.

[BARRAULT et al 01] M. Barrault, N. Regnaud, C. Duchêne, K. Haire, C Baeijs, P. Hardy, W. Mackaness, A. Ruas and R. Weibel : *Integrating multi-agent, object oriented and algorithmic techniques for improved automated map generalization,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, vol. 3, pp. 2110-2116, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-033/S-COM-MB, 2001.

[BEL HADJ ALI 01] A. Bel Hadj Ali : *Positional and shape quality of areal entities in geographic databases : quality information aggregation versus measures classification,* ECSQARU'2001, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-034/S-COM-ABHA, 2001.

[BOFFET 01] A. Boffet : *Création et Analyse Multi-Niveaux des Espaces Géographiques en milieu urbain,* 5èmes Rencontres de THEO QUANT, Besançon (F), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-025/S-COM-AB, 2001.

[BOFFET, ROCCA SERRA 01] A. Boffet and S. Rocca Serra : *Identification of Spatial Structures within Urban Blocks for Town Qualification,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, vol. 3, pp. 1974-1983, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-036/S-COM-AB, 2001.

[BOLDO et al 01] D. Boldo, F. Fuchs, F. Jung and Y. Wehrstedt : *Automating the aerial triangulation of digital aerial frame camera images,* The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Le Caire (Égypte), laboratoire MATIS, IGN-SR-01-012/C-COM-DB, 2001.

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

[BUCHER 01] B. Bucher : *Structuring and enriching metadata to enable users' access to geographic information resources*, 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août, vol. 4, pp. 2791-2797, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-008/S-COM-BB, 2001.

[BUCHER 01] B. Bucher : *A Model to Store and Reuse Geographic Application Patterns,* 4th AGILE conference: GI in Europe : Integrative, Interoperable, Interactive, Brno (République Tchèque), avril 2001, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-037/S-COM-BB, 2001.

[DE JOINVILLE et al 01] O. de Joinville, H. Maître, G. Maillet and M. Roux : *How to Design DEM's Assessment Maps,* Congrès GIIGN-SRUK, Université de Glamorgan (UK), 18-20 avril 2001, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-014/C-COM-ODJ, 2001.

[DE JOINVILLE et al 01] O. de Joinville, G. Maillet, H. Maître and M. Roux : *Évaluation a priori de la qualité d'un MNS,* Congrès ORASIS, Cahors (F), 5-8 juin 2001, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-015/C-COM-ODJ, 2001.

[DUCHÊNE 01] C. Duchêne : *Road generalisation using agents,* GISRUK (9th Annual Conference on GIS Research in United Kingdom), Glamorgan (UK), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-001/S-COM-CD, 2001.

[DUCHÊNE et al 01] C. Duchêne, C. Cambier & A. Ruas : *Mécanismes de coordination multi-agents pour la cartographie automatique,* 9èmes Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (poster), Montréal (Canada), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-038/S-COM-CD, 2001.

[DUCHÊNE et al 01] C. Duchêne, M. Barrault and K. Haire : *Road Network Generalization : a Multi Agents System Approach,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, vol. 3, pp. 2166-2177, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-039/S-COM-CD, 2001.

[FEISSEL, ALTAMIMI 01] M. Feissel and Z. Altamimi : *VLBI terrestrial frame results viewed through the ITRF2000 combination,* 2nd IVS Analysis Workshop, Washington (USA), 12-14 février 2001, communication non publiée, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[FEISSEL et al 01] A.-M. Gontier, M. Feissel, N. Essaifi, D. Jean-Alexis and K. Le Bail : *Paris Observatory Analysis Center report*, 2nd IVS Analysis Workshop, Washington (USA), 12-14 février 2001, communication non publiée, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[FEISSEL et al 01] M. Feissel, M. Yseboodt, V. Dehant, O. De Viron and C. Bizouard : *How much may one « cheat » the non-rigid Earth nutation theory to make it match the VLBI results ?* Journées Systèmes de Référence 2001, Éd. N. Capitaine. Observatoire de Paris, IGN/ENSG/ laboratoire LAREG, 2001.

[FRITSCH 01] E. Fritsch : *Deriving fast algorithms from generalisation to mobile mapping, Mobile Mapping Technology,* Cairo (Egypt), laboratoire COGIT, IGN-SR-01-040/S-COM-EF, 2001.

[FUCHS 01] F. Fuchs : *Building Reconstruction in Urban Environment : a Graph-based Approach,* 3rd International Workshop on Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images, Ascona (I), laboratoire MATIS, IGN-SR-01-008/C-COM-FF, 2001.

[GLEYZE 01] J.-F. Gleyze : *Étude topologique de la fonctionnalité des réseaux,* Conférence « Géomatique et espace rural », Journées Cassini, Montpellier (F), 18 pages, pp. 235-252, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-041/S-COM-JFG, 2001.

[GLEYZE 01] J.-F. Gleyze : *Les dommages induits par les coupures du réseau routier. Éléments de recherche pour l'évaluation de la fiabilité d'un réseau routier,* in Actes de la conférence « Risques d'accidents et risques environnementaux dans les transports routiers », Besançon (F), 15 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-042/S-COM-JFG, 2001.

[GONTIER et al 01] A.-M. Gontier, M. Feissel, N. Essaifi, D. Jean-Alexis and K. Le Bail : *Paris Observatory Analysis Center report*, 2nd IVS Analysis Workshop, Washington (USA), 12-14 février 2001, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[GONTIER et al 01] A.-M. Gontier, K. Le Bail and M. Feissel : *Time series of VLBI derived coordinates of extragalactic radio sources.* EGS XXVI General Assembly, Nice (F), 28 mars 2001, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[GUIGUES et al 01] L. Guigues, H. Le Men and J.-P. Cocquerez : *Graphs, Cocoons and Image Segmentation,* 3rd IAPR TC-15 Workshop on Graph-based Representations in Pattern Recognition, Ischia (I), mai 2001, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-018/C-COM-LG, 2001.

[GUIGUES et al 01] L. Guigues, H. Le Men & J.-P. Cocquerez : *Segmentation d'Image par Minimisation d'un Critère MDL dans une Pyramide de Segmentations,* Congrès GRETSI sur le traitement du signal et des images, Toulouse (F), septembre, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-022/C-COM-LG, 2001.

[HANGOUËT 01] J.-F. Hangouët : *Geographical Multi-Representation : Striving for the Hyphenation,* Séminaire Geo Info Fusion, Québec (Canada), 8-12 avril 2001, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-011/S-COM-JFH, 2001.

[HUBERT 01] F. Hubert : *Améliorer l'accès à l'information géographique par l'utilisation d'échantillons,* 48ème Colloque International sur le Document Electronique, Toulouse (F), 24-26 octobre 2001, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-044/S-COM-FH, 2001.

[HUBERT 01] F. Hubert : *Assistance mechanisms use for needs specifications in geographical information on the Web,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août, vol. 4, pp. 2320-2329, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-045/S-COM-FH, 2001.

[JACKOBSSON, VAUGLIN 01] A. Jackobsson & F. Vauglin : *Status of Data Quality in European National Mapping Agencies,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, vol. 5, pp. 2875-2883, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-016/S-COM-AJ, 2001.

[JUNG 01] F. Jung : *Détection hiérarchique d'objets par une stratégie séquentielle de questionnement,* XXIIIèmes Journées de la SFdS, Nantes (F), 14-18 mai 2001, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-019/C-COM-FJ, 2001.

[JUNG 01] F. Jung : *Detecting new buildings from aerial stereo pairs at different dates,* SPIE 46th Annual meeting. International symposium on optical science and technology, 29 july-3 august 2001, San Diego, Ca (USA), laboratoire MATIS, IGN-SR-01-032/C-COM-FJ, 2001.

[KADRI-DAHMANI 01] H. Kadri-Dahmani : *Updating in GIS: Towards a More Generic Approach,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, vol. 3, pp. 1463-1471, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-046/S-COM-HKD, 2001.

[LEMARIÉ, BADARD 01] C. Lemarié and T. Badard : *Cartographic database updating,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, vol. 2, pp. 1376-1385, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-019/S-COM-CL, 2001.

[MUSTIÈRE, DUCHÊNE 01] S. Mustière and C. Duchêne : *Comparison of different approaches to combine road generalisation algorithms: GALBE, AGENT and CartoLearn,* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 2001, disponible sur : http://www.geo.unizh.ch/ICAbin/documents, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-035/S-COM-SM, 2001.

[NOCQUET et al 01] J.-M. Nocquet, E. Calais and P. Nicolon : *Reference frame activity : combination of national (RGP) and regional (REGAL) permanent networks solutions with EUREF-EPN and the ITRF2000,* in National report of France at the EUREF symposium, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[PAPARODITIS, MAILLET 01] N. Paparoditis and G. Maillet : *Improving aerial image matchingtechniques in urban areas using a new true multi-image approach guided from object space,* N. El-Sheimy (CDROM eds), in Proc. 3rd International Workshop on mobile mapping technology, Cairo (Egypt), January 2001, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-002/C-COM-NP, 2001.

[PAPARODITIS et al 01] N. Paparoditis, G. Maillet, F. Taillandier, H. Jibrini, F. Jung, L. Guigues and D. Boldo : *Multi-image 3-D feature and DSM extraction for change detection and building reconstruction, Automatic Extraction of Man-Made objects from aerial and space images (III)*, Basel : Bïrkhaeuser Verlag, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-004/C-COM-NP, 2001.

[RUAS 01] A. Ruas : *Automating the generalisation of geographical data : The age of maturity ?* 4th ICA Workshop on generalisation (ACI), Pékin, Chine, 6-10 août 2001, vol. 3, pp. 1943-1953, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-002/S-COM-AR, 2001.

[SILLARD 01] P. Sillard : *The IERS pilot experiment on ITRS time series*, AGU Fall Meeting, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[TARNIEWICZ et al 01] J. Tarniewicz, O. Bock, J. Pelon and C. Thom : *A Scanning Raman Lidar for Tropospheric Water Vapor Profiling and GPS Path Delay Correction, Remote Sensing,* Toulouse (F), 2001b, laboratoire OEMI, IGN-SR-01-004/L-COM-JT, 2001.

[VIGLINO, GUIGUES 01] J.-M. Viglino and L. Guigues : *Cadastre map assembling : a puzzle game resolution,* 6th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR, Seattle (USA), septembre 2001, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-024/C-COM-JMV, 2001.

Autres communications

[ALTAMIMI et al 01] Z. Altamimi, C. Boucher, M. Feissel and P. Sillard : *Results of the ITRF2000 analysis*, EGS XXVI General Assembly, Nice (France), 25-30 mars 2001, communication non publiée, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[DE JOINVILLE, ROUX 01] O. de Joinville & M. Roux : *Levé laser aéroporté : évaluation et comparaison avec d'autres systèmes,* Journées scientifiques de l'ONERA, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-031/C-COM-ODJ, 2001.

[FEISSEL 01] M. Feissel : *Critères de stabilité du repère de référence international,* séminaire du DANOF, 5 mars 2001, communication non publiée, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[FEISSEL 01] M. Feissel : *L'observation géodynamique,* colloque du GdR AGRET, 7 novembre 2001, communication non publiée, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[FEISSEL 01] M. Feissel : *Le GRGS et la métrologie des systèmes de référence*, Atelier du GRGS, Paris, (France), 17-18 avril 2001, communication non publiée, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[FEISSEL, LE BAIL 01] M. Feissel & K. Le Bail : *Stabilité du repère de référence extragalactique,* communication non publiée, séminaire du laboratoire LAREG, IGN/ENSG, 2 février 2001.

[FUCHS et al 01] F. Fuchs, H. Jibrini, G. Maillet, N. Paparoditis, M. Pierrot Deseilligny & F. Taillandier : *Trois approches pour la saisie automatique de modèles 3-D urbains par stéréoscopie*, Journées scientifiques de l'ONERA, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-038/C-COM-FF, 2001.

[LE BAIL et al 01] A.-M. Gontier, K. Le Bail and M. Feissel : *Time series of VLBI-derived coordinates of extragalactic radio sources*, EGS XXVI General Assembly, Nice (France), 28 mars 2001, communication non publiée, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

Livres

[KASSER, EGELS 01] M. Kasser & Y. Egels : *Photogrammétrie Numérique,* Ed. Hermès, France, octobre 2001, 370 pages, IGN, ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[KASSER, EGELS 01] M. Kasser and Y. Egels : *Digital Photogrammetry,* Ed. Taylor & Francis, octobre 2001, 380 pages, IGN, ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[SILLARD 01] P. Sillard : *Estimations par moindres carrés*, Ed. Hermès (Paris), octobre 2001, 250 pages, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

Rapports de stage

[ALCOURROUN 01] M. Alcourroun : *Positionnement de plans 3-D par corrélation multi-vues,* rapport de stage de 2ème année de l'ENS Cachan, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-021/C-STA-MA, 2001.

[BERROUKECH 01] A. Berroukech : *Étude de l'unification sémantique de GeoRoute sur la BD Topo, thème réseau routier,* rapport de stage de DEA SIG de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-020/S-STA-AB, 2001.

[BRETEAU 01] C. Breteau : *Segmentation de MNE par calcul et d'une relation flou entre pixels voisins et projection sur une relation binaire transitive,* rapport de stage de 2ème année de l'École Supérieure d'électronique de l'Ouest, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-025/C-STA-CB, 2001.

[BRUN 01] J. Brun : *Réalisation d'une plateforme d'évaluation de segmentations d'images,* rapport de stage de 2ème année de Supelec, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-026/C-STA-JB, 2001.

[BRUNEAU 01] J.-E. Bruneau : *Amélioration du processus GALBE. Cas du « trou dans le symbole »,* DESS de cartographie et SIG, Université Paris-1, la Sorbonne/ENSG, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-005/S-STA-JEB, soutenu le 26 mars 2001.

[CHAPSAL 01] A.-C. Chapsal : *Analyse en Séries Temporelles de Variables Relatives au Mouvement du Pôle et à la Rotation de la Terre*, mémoire de DEA de statistiques de l'Université de Rennes & ENSAI, IGN/LAREG MS16, juin 2001.

[CHRISTOPHE 01] S. Christophe : *Analyse des structures urbaines. Implémentation d'un outil de détection et de caractérisation des alignements, sous le SIG Lamps2,* rapport de stage de l'ENSAR, 45 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-022/S-STA-JB, 2001.

[COMMOWICK, QUOST 01] B. Commowick & O. Quost : *Géoréférencement de planches cadastrales par appariement d'éléments routiers,* rapport de stage de 4ème année de l'Université technologique de Compiègne, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-027/C-STA-BC, 2001.

[DELVART 01] P. Delvart : *Reconstruction du bâti : amélioration de la précision d'une reconstruction,* rapport de stage de 2ème année de l'Ecole Supérieure d'électronique de l'Ouest, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-028/C-STA-PD, 2001.

[GESBERT 01] N. Gesbert : *Étude de la fédération de schémas dans les bases de données géographiques,* rapport de stage de DEA SIG de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-023/S-STA-NG, soutenu le 2 juillet 2001.

[GONÇALVES 01] C. Gonçalves : *Contrôle de la qualité d'une Base de Données Géographique,* rapport de stage de DEA de Statistique de l'Université Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-024/S-STA-CG, 2001.

[JAMET 01] O. Jamet : *Estimation locale de la composante régionale d'une anomalie du champ de pesanteur*, rapport de stage du DEA de Géophysique Interne de l'IPGP, Institut de Physique du Globe de Paris, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[LACROIX 01] P. Lacroix : *Visualisation de données dynamiques de mises à jour dans les bases de données géographiques,* DESS de cartographie et SIG, Université Paris-1, la Sorbonne/ENSG, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-004/S-STA-PL, soutenu le 26 mars 2001.

[LAMBERT 01] H. Lambert : *Cartographie du risque, représentation de l'aléa et de la vulnérabilité,* rapport de stage de DEA SIG de l'Université Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-006/S-STA-HL, 2001.

[LEFORT 01] M. Lefort : *Interface pour un logiciel de placement automatique des écritures. Conception et réalisation,* rapport de projet pluridisciplinaire, ENSG, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-029/S-STA-ML, soutenu le 25 septembre 2001.

[SCHÖN 01] S. Schön : *On the Datum Quality of a continental ITRF96 based Reference Network in Antarctica,* mémoire d'ingénieur de l'Université de Karlsrühe (D), IGN/LAREG MS15, avril 2001.

[SHEEREN 01] D. Sheeren : *Étude des incohérences topologiques et sémantiques entre représentations multiples de phénomènes géographique,* rapport de stage de DEA SIG de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-017/S-STA-DS, soutenu le 3 juillet 2001.

[TOLU 01] V. Tolu : *Techniques de qualification d'hypothèses de contours 3-D à partir d'un ensemble d'images aériennes,* rapport de stage de 4ème année de l'Université technologique de Compiègne, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-029/C-STA-VT, 2001.

[ZERHOUNI 01] R. Zerhouni : *Description de l'environnement spatial d'un objet géographique,* rapport de stage de DEA SIG de l'Université de Marne-la-Vallée, 37 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-018/S-STA-RZ, 2001

Rapports internes et comptes rendus

[BOCK, DOERFLINGER 01] E. Doerflinger & O. Bock : *Tomographie de la vapeur d'eau troposphérique par GPS et autres techniques de sondage. Bilan des opérations de terrain et présentation des données acquises,* laboratoire OEMI, IGN-SR-01-007/L-RAP-OB, septembre 2001.

[BOUIN et al 01] M.N. Bouin, M. Llubes and N. Florsch : *Determination of ocean loading effects using a GPS permanent network in France,* European Geophysical Society XXVII General Assembly, poster presentation, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2001.

[FEISSEL et al 01] M. Feissel, … & vingt auteurs : *L'observation géodynamique, GdR AGRET*, 50 pages, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, juin 2001.

[FEISSEL, ALTAMIMI 01] M. Feissel & Z. Altamimi : *L'importance d'une antenne VLBI à Tahiti*, rapport au GRGS, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, mai 2001.

[GUIGUES 01] L. Guigues : *Approches Structurelles pour la Segmentation d'Image, séance plénière du GT3 : Système de Segmentation pour la représentation et l'analyse des images,* du GdR ISIS (CNRS/MENRT), http://www-isis.enst.fr, laboratoire MATIS, SR 01-006/C-RAP-LG, mars 2001.

[HOTTIER 01] P. Hottier : *Aérotriangulation Analytique : BottomAero. Essais divers. Étude d'un bloc avec GPS absolu (Amiens 2000),* laboratoire MATIS, IGN-SR-01-011/C-RAP-PH, juin 2001.

[LE BAIL et al 01] K. Le Bail, U. Hugentobler & M. Feissel : *L'accès aux données DORIS, un préalable au succès de l'IDS,* Groupe Mission DORIS, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, octobre 2001.

[TRÉVISAN 01] J. Trévisan : *Avancement EP25k au 21septembre 2001,* laboratoire COGIT, IGN-SR-01-055/S-ART-JT, septembre 2001.

[TRÉVISAN 01] J. Trévisan : *Décompte du Type 93*, laboratoire COGIT, IGN-SR-01-056/S-ART-JT, septembre 2001.

Publications 2002, citées en référence dans le bulletin

[DEHANT et al 02] V. Dehant, M. Feissel, O. De Viron, M. Yseboodt and C. Bizouard : *Nutation at the sub-milliarcsecond level,* soumis à JGR, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2002.

[JAMET, DIAMENT 02] O. Jamet and M. Diament : *On the estimation of the spectral representations of gravity anomalies*, in Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2002 (à paraître).

[NOCQUET, CALAIS 02] J.-M. Nocquet and E. Calais : *Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996-2001,* soumis à Geophysical Journal International, IGN/ENSG/laboratoire LAREG, 2002.

[TAILLANDIER, DERICHE 02] F. Taillandier & R. Deriche : *Reconstruction de primitives linéaires 3-D en multi-vues pour la modélisation de scènes urbaines ?* RFIA'02, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-002/C-ART-FT, 2002.