



HAL
open science

La recherche à l'IGN : activité 1997

Serge Motet, Jean-Philippe Souchon, Thierry Badard, Mustière Sébastien, Zuheir Altamimi, Patrick Sillard, Guy Woppelmann, Jean-Daniel Piquet Pellorce, Marc Pierrot-Deseilligny, Patrick Julien, et al.

► **To cite this version:**

Serge Motet, Jean-Philippe Souchon, Thierry Badard, Mustière Sébastien, Zuheir Altamimi, et al..
La recherche à l'IGN : activité 1997. Bulletin d'information de l'IGN N°69. 1998. hal-02372695

HAL Id: hal-02372695

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372695>

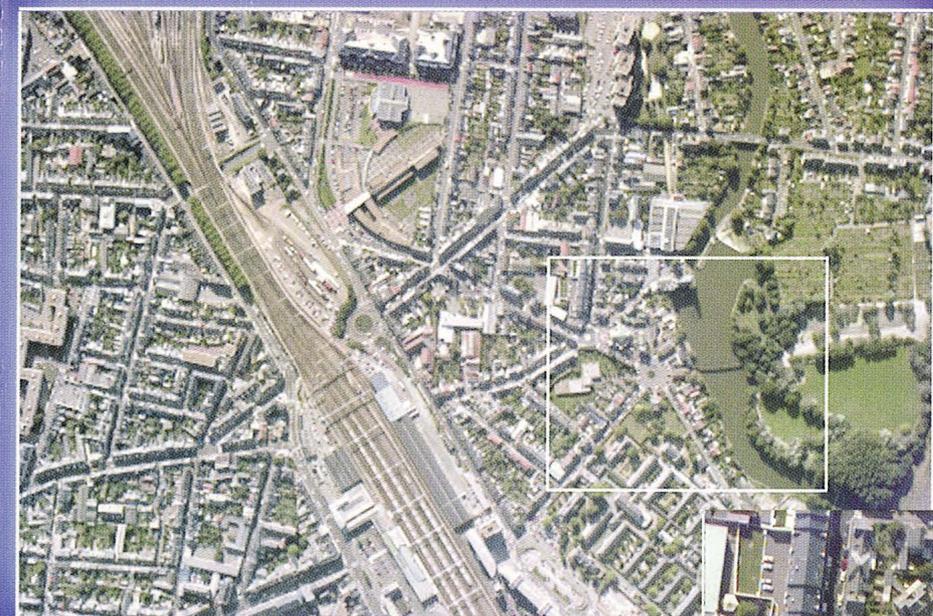
Submitted on 20 Nov 2019

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.

BI

BULLETIN D'INFORMATION DE L'IGN



**INSTITUT
GÉOGRAPHIQUE
NATIONAL**

RECHERCHE 97

**La recherche
à l'Institut Géographique National**

Activité 1997

La recherche en 1997

01 Classement IGN-SR : **980001/R-LIV**

02 Livre

03 Nom et adresse du directeur de la publication :

Jacques POULAIN

IGN

2-4 avenue Pasteur

F-94165 Saint Mandé cedex

04 Rédacteur en chef : Serge MOTET (IGN)

05 Réalisé au Service de la Recherche de l'IGN

IGN

2-4 avenue Pasteur

F-94165 Saint-Mandé CEDEX

06 Titre : La recherche en 1997

07 Date d'édition : 1998

13 Numéro 69

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

Adresse pour le courrier concernant le Bulletin d'Information de l'IGN à :

Isabelle Melot

IGN

2-4 avenue Pasteur

F-94165 Saint-Mandé CEDEX

Résumé

Ce numéro traite des activités de recherche de l'Institut Géographique National-France en 1997. Il dresse un bilan des progrès réalisés en traitement d'images et de cartes scannées, en photogrammétrie, en instrumentation, en base de données géographiques, en cartographie et en géodésie. Il aborde plus particulièrement les sujets suivants :

- le filigrane pour protéger des cartes scannées,
- la restitution automatique des bâtiments sur photos aériennes,
- des images aériennes numériques en couleur,
- la mise à jour des bases de données géographiques,
- la généralisation cartographique du réseau routier,
- l'appariement géométrique de surfaces,
- une nouvelle génération de réalisation du Système International de Référence Terrestre,
- la détermination des variations du centre des masses de la Terre,
- la synergie entre la marégraphie et la géodésie spatiale.

Mot-clé principal : Information géographique.

Mots-clés : IGN - Recherche - Cartographie - Géodésie - Instrumentation - Photogrammétrie - SIG - Traitement d'image.

En couverture : image issue de la caméra numérique de l'IGN. Cette image a été acquise au-dessus du Mans le 10 septembre 1997. Le pixel de prise de vue est de 40 cm. L'image couleur entière est en haut à droite (3072 par 2048 pixels). Deux agrandissements successifs sont en dessous. Sur l'image du bas, on remarque les détails à l'ombre bien visibles, ainsi que la finesse de l'image des voitures.

Table des matières

A	LA RECHERCHE A L'IGN	1
B	QUELQUES ACTIONS MARQUANTES	7
B.1	Filigranage d'images de cartes	5
	Contexte	5
	Objectif	5
	Description de la méthode	6
	Eléments d'évaluation	6
	Suite	8
B.2	Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains	9
	Démarche	9
	Résultats, exemples d'applications	13
	Conclusions et perspectives	13
B.3	Les images numériques maintenant en couleur	17
	Contexte - objectifs	17
	Principales caractéristiques de la nouvelle caméra	18
	La mission sur Le Mans du 10 septembre 1997	19
	Chaîne de traitement des images numériques couleur	20
	Les corrections colorimétriques	20
	Mission CNES PPU (Programme Préparatoire à l'Utilisation de SPOT 5)	24
	Industrialisation	24
	Perspectives pour 1998	24
B.4	Premières pistes pour une mise à jour générique des bases de données géographiques	25
	Objectifs	25
	Actions menées	25
	Une typologie des problèmes liés à l'intégration des mises à jour	27
	Premières pistes pour une mise à jour générique	28
	Suite	31
B.5	Généralisation adaptative du linéaire basée sur la détection des empâtements, application au routier	33
	Introduction	33
	Détection et caractérisation d'empâtements	34
	Algorithmes de traitement locaux	36
	Processus global	38
	Résultats	40
	Axes de recherche	41
B.6	Appariement géométrique de surfaces	43
	Contexte	43
	Actions menées	44
	Suite	50
B.7	L'ITRF96 : nouvelle génération de réalisation du Système International de Référence Terrestre	51
	Méthodologie	51
	Les données utilisées	52
	Analyse des données et calcul de l'ITRF96	53
	Analyse des résultats de l'ITRF96 et conclusions	54
B.8	Détermination des variations du géocentre	57
	Contexte de l'étude	57
	Physique du phénomène	57
	Méthodologie de la mesure	58
	Les résultats	59
	Discussion	62

B.9	Marégraphie et géodésie spatiale : bilan d'un travail de recherche sur leur synergie	65
	Introduction : contexte de l'étude	65
	Concepts de niveau moyen de la mer et d'eustatisme	66
	Analyse des enregistrements des marégraphes	68
	Systèmes de référence	69
	Synergie de la marégraphie et de la géodésie spatiale	71
	Le marégraphe de Marseille	74
	Conclusion et perspectives	75
C	BILAN DES ACTIONS DE RECHERCHE	79
C.1	Image et photogrammétrie	79
	C.1.1 Lecture automatique de cartes scannées	79
	C.1.2 Conception et mise en œuvre d'algorithmes pour la restitution 3-D	80
	C.1.3 Restitution des bâtiments pour la cartographie à grande échelle	81
	C.1.4 Détection de changement pour la BD TOPO	83
	C.1.5 Extraction automatique des routes sur images aériennes	85
	C.1.6 Restitution automatique des carrefours routiers	86
	C.1.7 Passage en production, d'outils semi-automatiques pour le routier	87
	C.1.8 Suivi automatique de routes : vers une utilisation à plus basse résolution	88
	C.1.9 Bibliothèque de photogrammétrie numérique	90
	C.1.10 Données multi-sources pour la restitution du relief en zone boisée	92
C.2	Instrumentation	94
	C.2.1 Prototypage d'instrumentation aéroportée télémétrie laser (dispositif TAMS)	94
C.3	SIG et cartographie	95
	C.3.1 Placement automatique des toponymes	95
	C.3.2 Base de données multi-échelles	97
	C.3.3 Modélisation base de données géographiques en trois dimensions	98
	C.3.4 Mécanismes de mise à jour entre bases de données géographiques	100
	C.3.5 Recherche sur la qualité des données géographiques	101
	C.3.6 Interopérabilité	104
	C.3.7 Généralisation du linéaire : une approche nouvelle	106
	C.3.8 Généralisation du réseau	107
	C.3.9 Généralisation contextuelle	109
C.4	Géodésie	112
	C.4.1 Positionnement DORIS	112
	C.4.2 Détermination du géoïde	115
	C.4.3 Étude du mouvement tectonique par méthodes géodésiques	117
	C.4.4 JASON	119
	C.4.5 Positionnement PRARE	120
	C.4.6 GNSS et GLONASS	121
	C.4.7 Système de référence terrestre	122
	C.4.8 Réseau GPS permanent	126
	C.4.9 GPS cinématique	127
D	PUBLICATIONS	127
	ERRATUM (A PROPOS DU N° 68)	131

Serge Motet

Contexte

Depuis une dizaine d'années, on assiste à une évolution irréversible de la cartographie - au sens le plus large - vers l'information numérique. Cette évolution offre des perspectives nouvelles dans la diffusion et l'utilisation des cartes, ou plus précisément de l'information géographique, c'est-à-dire l'information contenue dans les cartes.

Ces perspectives, dont l'intérêt est autant économique que scientifique, ont provoqué un important effort de recherche et développement, en France et dans le monde.

L'information géographique fait intervenir différentes disciplines. Elle relève, entre autres, de différents aspects de l'informatique, du traitement d'image, de la communication visuelle et de l'organisation des systèmes d'information. Elle a aussi développé ses méthodes propres de saisie et de gestion comme l'utilisation de satellites de positionnement (GPS) et de nouveaux capteurs et instruments électroniques.

L'Institut Géographique National (IGN) est l'établissement public en charge de la cartographie. Outre cette activité bien connue de production de cartes et de données, l'IGN a une activité de recherche qui va au-delà du développement de ses processus de production.

En effet, les statuts de l'IGN lui donnent comme mission de mener des recherches d'intérêt général correspondant à son activité de production : couverture nationale en cartes topographiques et photographies aériennes, numérisation de l'information géographique, réseaux géodésiques, télédétection ... Ainsi, l'IGN apporte sa contribution au développement à long terme de l'information géographique.

Le Bulletin d'Information de l'IGN n° 69 fait le bilan de cette contribution et des recherches menées en 1997.

A la lecture de ce bulletin, on notera certainement que la recherche de l'IGN est finalisée. Cela est en cohérence avec sa principale mission de production. Plus précisément, les objectifs de la recherche à l'IGN sont :

- l'anticipation, à moyen et long terme, des méthodes de production, et en particulier, de la production des bases de données géographiques,
- la reconnaissance de l'IGN dans la communauté scientifique, notamment par les publications,
- la réalisation de contrats de recherche.

Structure de la recherche

Les activités de recherche sont confiées à 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 LAREG dépend de l'École Nationale des Sciences Géographiques à Marne-la-Vallée (77).

Les effectifs des laboratoires au 1er décembre 1997 sont les suivants :

tableau A.1 : évolution des effectifs de recherche

	Chercheurs	dont thésards	dont contrats de recherche	support technique	Total
MATIS	14	5	2	2	16
LOEMI	3	0		2	5
COGIT	15	6	2	1	16
LAREG	8	2		5	13

Axes de recherche

Instrumentation

La principale action est la mise au point d'un appareil de prise de vue aérienne utilisant comme capteur une matrice CCD. La numérisation s'effectue pendant la prise de vue. Ces capteurs ont une dynamique très supérieure aux clichés argentiques. Cette caméra s'insère beaucoup plus simplement dans un processus numérique.

Image et photogrammétrie

Les recherches portent sur la saisie photogrammétrique, c'est-à-dire l'utilisation des photographies aériennes pour détecter et tracer une carte des détails topographiques : routes, bâtiments ...

Ces recherches s'appuient sur des outils d'analyse d'image et sur les techniques photogrammétriques (permettant d'obtenir une géométrie tridimensionnelle par la vision stéréoscopique de deux images du même lieu prises de points de vue différents).

L'accent est mis sur l'utilisation de plusieurs sources concourant à la détection des détails. Par exemple, on utilise des bases de données moins précises ou des indices trouvés sur des cartes scannées.

D'autre part, l'IGN a une approche par thème. La restitution du relief par corrélation automatique et la restitution des routes sont les sujets les plus avancés. La détection du bâti constitue la prochaine étape.

En parallèle, des études sont actuellement en cours sur la lecture automatique de cartes scannées (reconnaissance des écritures et des symboles).

Système d'Information Géographique (SIG)

Les recherches portent sur l'amélioration des systèmes actuels de gestion de données localisées et sur leur usage. Il s'appuie sur des systèmes de gestion de bases de données (SGBD) et en particulier sur les SGBD Orienté-Objet. Les domaines de recherche sont :

- la modélisation et de la gestion de la qualité,
- la mise à jour des bases de données,
- la fusion et la gestion de données de précisions différentes,
- la gestion du 3-D.

Généralisation cartographique

C'est la dernière étape d'un processus totalement numérique. L'objectif est de produire de façon automatique, des cartes claires et lisibles à partir de bases de données. Il s'agit de placer les toponymes, de simplifier certains détails graphiques, d'en mettre d'autres en évidence, de réduire les superpositions et les confusions. Les options étudiées sont l'approche algorithmique et l'approche par des systèmes experts pour la résolution des conflits.

Géodésie

Les thèmes de recherche sont :

- les systèmes de référence terrestre et la participation à l'établissement d'un système de référence mondial,
- les références verticales,
- l'apport de la géodésie à la géodynamique,
- les techniques de positionnement.

Progrès en 1997

On retrouvera les progrès marquants de 1997 dans les articles de la partie B de ce bulletin. Si on tente d'en extraire quelques points-clés, on peut citer - entre autres - les actions suivantes :

Instrumentation

Le point essentiel est la réalisation d'une caméra couleur.

Analyse d'image aérienne et photogrammétrie

Les recherches ont progressé en particulier sur deux points :

- restitution du bâti à grande échelle,
- détection de changement.

Les recherches sur la restitution automatique des routes sont suffisamment avancées pour permettre une exploitation.

Lecture automatique de cartes scannées

Les résultats de recherche sont plus qu'encourageants; cela permettra de passer aux phases d'évaluation sur les critères de production puis de développement.

Système d'Information Géographique (SIG)

L'action sur la mise à jour des BD géographiques a été mise en place, avec de nombreuses collaborations externes à l'IGN. Les développements scientifiques sur la gestion de la troisième dimension ont débuté. Enfin, la recherche sur la qualité s'est orientée vers l'étude de l'adéquation des paramètres de qualité.

Cartographie

En généralisation cartographique, des progrès importants ont été réalisés sur la recherche de structures adaptées à la généralisation. Les travaux sur le placement de noms se sont poursuivis par des applications sur les noms le long des lignes - en particulier les noms de rues -. En outre, de nouveaux algorithmes géométriques ont été développés, et l'utilisation du multi-agents et des bases de règles pour une stratégie globale de conception cartographique a été explorée.

Géodésie

Les progrès les plus marquants sont :

- une nouvelle solution ITRF96,
- des essais de détermination du géocentre dans le cadre d'une campagne internationale,
- l'initialisation du Réseau GPS Permanent en France.

Résultats

Publications

On trouvera à la fin de ce bulletin, la liste complète des publications de l'IGN. Une vingtaine d'articles écrits ou co-rédigés par des agents de l'IGN ont été publiés dans des revues.

Des agents de l'IGN ont participé à une trentaine de congrès ou séminaires.

Contrats de recherche

En ce qui concerne les contrats de recherche, l'IGN a participé principalement à deux projets européens :

- le projet Commuter du programme Esprit est piloté par Bull. Il a pour objet de gérer la mise à jour et l'historique de l'information géographique,
- le projet Geoserve du programme Télématique est piloté par Siemens. Il étudie l'échange d'information géographique par des réseaux télématiques.

A partir de décembre 1997, l'IGN a pris la direction d'un projet du programme Esprit du domaine "recherche à long terme". Ce projet, nommé Agent, traite de la généralisation cartographique en utilisant les systèmes multi-agents.

Relations scientifiques

Au niveau national, l'IGN participe plus particulièrement aux activités :

- du groupe de recherche en géodésie spatiale (GRGS),
- du groupement de recherche sur les SIG (GDR CNRS 1041 : Cassini).

Au niveau international, l'IGN est très actif dans les groupes de travail des associations scientifiques ou sociétés savantes :

- ACI Association cartographique internationale,
- BGI Bureau gravimétrique international,
- EUREF European reference frame,
- IERS International earth rotation service,
- IGS International GPS geodynamic service,
- OEEPE Organisation européenne d'études photogrammétriques expérimentales.

Résultats académiques et relations avec l'Université

Neuf thèses de doctorat ont été soutenues en 1997 :

Caroline Baillard	10 octobre	Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution en 3-D des milieux urbains. Détection et caractérisation du sursol.
Ghislaine Bordes	11 juin	Interprétation d'images aériennes guidée par une base de données cartographiques : application à l'extraction automatique des routes.
Thomas Devogele	12 décembre	Processus d'intégration et d'appariement de bases de données géographiques. Application à une base de données routières multi-échelles.
Thierry Duquesnoy	24 avril	Contribution de la géodésie à l'étude de grands décrochements actifs associés à des zones de subduction à convergence oblique. Exemples de la grande faille de Sumatra et de la faille Philippine.
Emmanuel Fritsch	12 décembre	Représentation de la géométrie et des contraintes cartographiques pour la généralisation du linéaire routier.
Robert Mariani	25 septembre	Contribution à la lecture automatique de cartes.
Pascale Monier	10 juillet	Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique. Application à la généralisation.
François Vauglin	21 avril	Modèles statistiques des imprécisions géométriques des objets géographiques linéaires.
Guy Wöppelmann	23 juin	Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par des techniques de géodésie spatiale.

Une vingtaine de stagiaires de troisième cycle ou d'école d'ingénieurs ont été accueillis dans les laboratoires de l'IGN.

Chercheurs invités

Avec le concours de la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) du Ministère de l'équipement, l'IGN a accueilli :

- Geoffrey Edwards, professeur à l'Université Laval à Québec, du 30 juin au 11 juillet.

B.1 Filigranage d'images de cartes

Marc Pierrot Deseilligny

Contexte

Le développement rapide de l'édition et de la diffusion de données numériques (sons, images, séquences vidéo) pose un problème particulier pour la protection du copyright puisque, contrairement aux supports traditionnels, les informations contenues peuvent être dupliquées à l'infini sans perte de qualité par rapport aux originaux.

Une technique possible pour assurer cette protection, est le "filigranage électronique" : un filigrane électronique est une information (identifiant le propriétaire du copyright, l'utilisateur autorisé ou ce que l'on veut) directement incluse dans les données diffusées afin que l'on ne puisse pas facilement la supprimer.

Ce type de technique apporte une protection plus robuste contre le piratage qu'un marquage en en-tête de fichier qui, par exemple, disparaît par une simple conversion de format.

Les qualités habituellement requises de la part d'un système de filigranage sont les suivantes :

Discrétion

Le filigranage ne doit pas altérer la qualité du document.

Sécurité cryptographique

Il ne doit pas être possible d'identifier la marque, et encore moins de la supprimer, sans la connaissance d'une "clé cryptographique".

Résistance au découpage

La marque doit pouvoir être retrouvée à partir d'un extrait du document.

Résistance aux altérations volontaires

Le marquage doit subsister aux transformations géométriques (rotations, homothéties) et aux opérations courantes de traitement d'images (filtres passe-bas, rehaussement de contraste...); il est clair que la résistance ne peut être que partielle et que le but est que le marquage subsiste jusqu'à ce que le document soit devenu suffisamment dégradé pour être de peu de profit au pirate potentiel.

Autonomie

Le marquage doit pouvoir être retrouvé sans connaissance de l'image originale; ce dernier point se justifie, tant par des raisons pratiques (difficulté d'aller rechercher l'original parmi des milliers) que théoriques (voir [CRAVER]) qui explique comment le pirate peut inverser complètement les rôles "copieur/copié" dans les systèmes où l'original est requis pour l'identification).

Objectif

Cette étude répond à une demande de la Direction commerciale de l'Institut Géographique National qui souhaitait disposer d'un moyen de protéger, contre les copies illicites, les cartes IGN scannées diffusées sur CD-ROM (SCANE25...).

Une contrainte importante de ce contexte est que l'image initiale est une image binaire, ou une image d'étiquettes, et que l'image finale doit le rester (notamment pour assurer l'efficacité de la compression de données).

De nombreuses techniques de filigranage électronique ont été proposées dans la littérature récente (par exemple, [COX], [CRAVER]...) mais elles s'appliquent toutes à des images à tons continus (niveau de gris ou RVB).

Elles ne sont pas transposables au contexte des cartes car elles utilisent une notion de "petite" variation des couleurs qui est évidemment absente des images d'étiquettes.

On a donc été conduit à rechercher de nouvelles méthodes spécialement adaptées aux images de cartes. Deux méthodes ont été développées et testées et il a été décidé de rendre publique celle qui est décrite dans la suite de ce rapport.

Description de la méthode

Le cas d'une image d'étiquettes, avec N étiquettes, se ramenant trivialement au cas des images binaires (on décompose en N images binaires, on effectue le traitement et on recompose), on ne considère ici que des images binaires.

Dans la méthode, la marque est elle-même une petite image binaire comme, par exemple, celle de la figure B.1.1.



figure B.1.1 : un exemple de marque

Inscription de la marque

La méthode d'insertion de la marque, illustrée par la figure B.1.2, est la suivante :

- soit une image initiale I (image a) et m une marque (figure B.1.1),
- soit l'image M^* obtenue par une répétition périodique de la marque m (image b),
- soit l'image I_m , définie par "un pixel $I_m(x,y)$ est noir si : $I(x,y)$ est blanc; $I(x+1,y)$ est noir et $M^*(x,y)$ est noir" (les pixels noirs de I_m correspondent aux points noirs de l'image c),
- on définit alors l'image I^m , image de I filigranée par m , par : "un pixel est noir dans I^m , si il est noir dans I ou dans I_m " (image d), c'est l'image I^m qui sera diffusée aux clients.



figure B.1.2 : construction du filigrane

Extraction de la marque

Intuitivement, l'image I^m contient encore un peu d'information sur m , car la probabilité d'être un pixel noir de M^* est un peu plus grande pour un pixel noir de I^m que pour un pixel purement aléatoire (ce sont évidemment les pixels de I_m qui biaisent les statistiques).

Pour retrouver m à partir de I^m , et prouver ainsi sa propriété sur l'image, il suffit donc de faire la moyenne d'un nombre suffisamment grand de sous-images de la même taille que m et décalées de la période adéquate.

La figure B.1.3 représente la marque extraite d'une grande image (taille 3000 x 3000) après rehaussement de contraste.



figure B.1.3 : une marque extraite sur une image 3000 x 3000

Éléments d'évaluation

On évalue ici rapidement la méthode vis-à-vis des prérequis décrits plus haut. Une description plus détaillée est donnée dans [PIERROT].

La figure B.1.4 représente une image de carte avant et après filigrane et permet d'évaluer le procédé du point de vue du critère de discrétion.

On peut constater que la perte de qualité entre l'image filigranée et l'image initiale est à peine perceptible (il s'agit cependant d'un critère très subjectif).

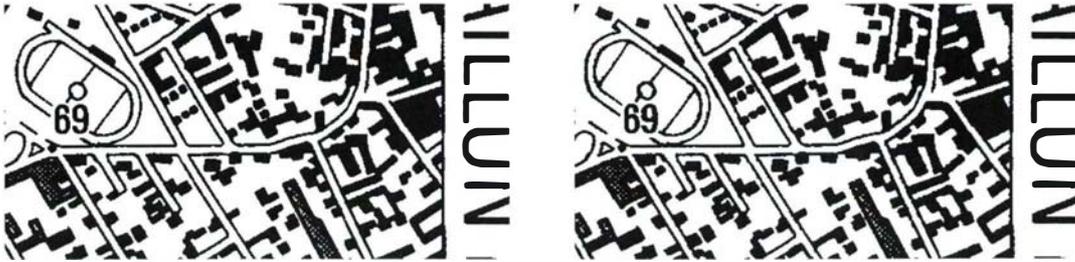


figure B.1.4 : une image avant et après filigranage

La figure B.1.5 illustre la résistance du procédé au découpage.

Sur cet exemple, on peut constater que le marquage extrait devient de mauvaise qualité lorsque la taille de l'image descend en dessous de 600 x 600 pixels.

Ceci n'est pas très gênant dans le contexte cartographique où l'on ne tient pas spécialement à se protéger contre un "pirate" dérochant des images de cette taille.



figure B.1.5 : résistance au découpage; marques extraites sur des images de taille 1000, 800, 600 et 400

La figure B.1.6 illustre la résistance du procédé de marquage à différentes altérations volontaires possibles.

Pour les transformations géométriques, il est nécessaire d'estimer les paramètres puis d'appliquer la transformation inverse avant de pouvoir retrouver la marque (image b).

Pour la squelettisation (image e), la marque devient de mauvaise qualité mais reste visible (en regardant l'image de loin); de toute façon, il s'agit du type de transformation où, pour supprimer incomplètement le marquage, il faut altérer l'image de manière non négligeable.

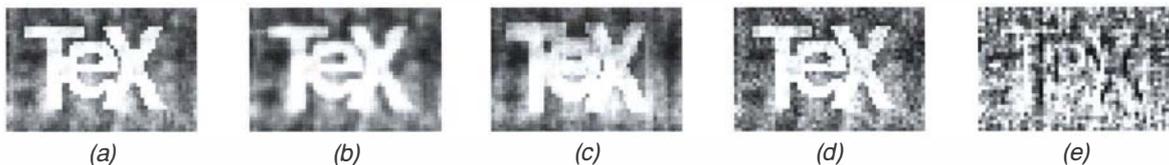


figure B.1.6 : résistance à différentes opérations de traitement d'image.

Marques extraites sur des images : non traitée (a), après rotation homothétie et correction inverse (b), dilatation selon le 8-voisinage (c), ajout d'un bruit aléatoire à 5% (d) et squelettisation (e).

Enfin, pour le critère de sécurité cryptographique, le procédé admet une variante (décrite en détail dans [PIERROT]) qui prend en paramètre une clé de "chiffrement / déchiffrement" qui peut être n'importe quelle transformation du plan.

La figure B.1.7 illustre le résultat de cette variante pour celui qui possède la clé (image a) et pour celui qui en possède une version même légèrement erronée.

Le nombre de paramètres de ce type de clé étant potentiellement infini, on se protège ainsi contre les attaques par recherche combinatoire.

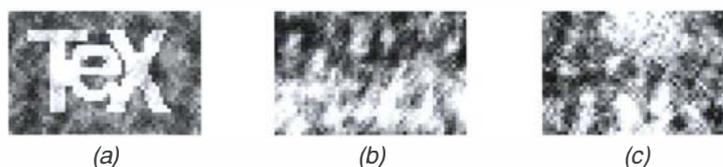


figure B.1.7 : variante avec clé : marque retrouvée avec la bonne clé (a) et marques retrouvées avec des clés "légèrement erronées" (b et c).

Suite

A l'heure actuelle, cette étude est considérée comme close du point de vue de la recherche.

Références

[COX] I.J. Cox, J. Kilan, T. Leighton & T. Shanon : *Secure Spread Watermarking for Multimedia*, Technical report 95-10, NEC Research Institute, Princeton (USA), 1995.

[CRAVER] S. Craver, N. Menon, B.L. Yeo & M. Yeung : *Can Invisible Watermark Resolve Rightfull Ownerships?*, IBM Resarch Report, July 96.

Publications

[PIERROT 98] Marc Pierrot Deseilligny & Hervé Le Men : *An Algorithm for Digital Watermarking of Binary Images, Application to Map and Text Images*, article soumis à International Workshop on Computer Vision, Hong-Kong, 3-4 septembre 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980002/C-COM, 1998.

B.2 Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains

Olivier Dissard

Introduction

Cet article fait le point sur les travaux conduits entre septembre 1994 et 1997 concernant l'analyse 3-D des scènes urbaines à partir de couples stéréoscopiques d'images aériennes.

Le but de cette recherche est d'effectuer une première appréhension du relief de la scène photographiée, sous la forme de données 3-D réparties régulièrement : les MNE (Modèles Numériques d'Élévations). Des outils d'analyse de ces données 3-D et des radiométries des images initiales sont mis au point, ils permettent d'extraire des zones d'intérêt destinées aux algorithmes plus ciblés tels que les algorithmes de reconstruction des bâtiments.

Les résultats de cette étude s'adressent non seulement aux autres actions de recherche du laboratoire MATIS (actions "reconstruction du bâti", "détection de changements",...) mais aussi à différentes applications de la production (fabrication de données 3-D pour la simulation urbaine, fabrication d'ortho-images urbaines à grande échelle avec redressement des bâtiments,...).

Nous présentons tout d'abord notre démarche, puis les différentes étapes de l'étude, montrons quelques résultats et applications et enfin présentons nos orientations pour l'avenir.

Ces recherches ont été menées par Caroline Baillard et Olivier Dissard. Caroline Baillard a soutenu sa thèse [BAILLARD 97] (direction Henri Maître, ENST) le 10 octobre 1997 à l'ENST.

Démarche

Images étudiées, caractéristiques des scènes urbaines

Les images étudiées sont extraites des missions régulières de l'IGN au 1 : 20 000 et 1 : 30 000 et des missions urbaines à plus grandes échelles. La taille de pixel varie de 20 cm à 1 m.

Les contextes sont aussi variés que possible pour cette étude: le terrain peut être en pente, la forme et l'agencement des bâtiments entre eux et avec les arbres devant être quelconques. De même les hauteurs de bâtiment peuvent prendre des valeurs élevées, les tours étant des objets courants des milieux urbains et péri-urbains.

Les caractéristiques des scènes urbaines sont :

- une multiplication d'objets adjacents de natures souvent différentes,
- des objets aux parois verticales : il n'est pas possible d'introduire des contraintes de continuité sur la surface des objets vus, ce que l'on fait typiquement lorsque l'on calcule un MNT,
- des occlusions, dues à la présence des parois verticales ou en forte pente, elles peuvent être axiales (la région apparaît sur une seule image) ou latérales par rapport à la ligne de vol (la région n'apparaît sur aucune image),
- des objets mobiles qui mettent en échec les procédures de mise en correspondance d'images.

Stratégie d'analyse

A l'origine de cette recherche, nous sommes partis du principe que la fabrication d'un relief précis à partir de l'analyse d'images, ne peut se faire à l'aide d'un algorithme générique, mais doit utiliser des outils adaptés aux objets présents. Pour cela il convient de mettre en oeuvre des outils de focalisation d'attention qui doivent comprendre une analyse 3-D globale de la scène, l'extraction de zones d'intérêt et leur caractérisation.

Par exemple, pour pouvoir appliquer des algorithmes de reconstruction de bâtiments tel que celui développé au laboratoire MATIS par Tuan Dang (voir Bulletin d'Information n° 64), recherchant par groupement perceptuel les rectangles présents dans une image puis cherchant à les repositionner en 3-D, nous devons tout d'abord construire un premier relief de la scène, y distinguer les régions qui correspondent à un objet du sursol, et enfin rechercher parmi ces régions, celles qui possèdent des formes radiométriques linéaires. Nous évitons ainsi une recherche de rectangle sur l'ensemble de l'image qui aboutit à une multiplication de rectangles inutiles (notamment reconstruit à l'aide des lignes de

trottoirs) et souvent à une explosion combinatoire.

L'analyse a porté essentiellement sur trois étapes :

- la fabrication d'un MNE par corrélation d'un couple d'images aériennes. Ce MNE doit tenir compte des particularités des milieux urbains, notamment la présence de faces verticales et d'occlusions, et doit être suffisamment dense et peu bruité pour permettre d'isoler les objets du sursol dans leur intégrité,
- l'extraction des zones d'intérêt qui isolent chaque objet du sursol ou plusieurs objets adjacents et possédant la même altitude. Là aussi, l'algorithme doit tenir compte des particularités des milieux urbains : adjacence d'objets d'altitudes différentes, objets avec surface en pente (pavillons) ou bombée (arbres, dômes), cours intérieures,
- une caractérisation grossière des zones d'intérêt en bâti et végétation qui correspond en fait à une séparation des zones de sursol en zones linéairement structurées et en zones "chaotiques". Cela n'exclut pas que l'on ait à diviser une région de sursol en plusieurs sous-régions thématiques.

Comme nous le verrons dans les exemples, une telle démarche conduit à des résultats intermédiaires qui, outre l'objectif final de reconstruction d'objets 3-D, se révèlent prometteurs pour d'autres applications telles que l'ortho-imagerie, la fabrication de MNT urbains, la détection de changements....

Fabrication du relief

Le but de cette première étape est de fournir un premier relief de la scène représentée par le couple d'images. Ce relief doit permettre d'isoler les régions de sursol en milieu urbain, c'est pourquoi il doit posséder les propriétés suivantes :

- conservation des faces verticales : le MNE ne doit pas être continu,
- densité des disparités : on n'exige pas l'exhaustivité des disparités mais on veut qu'elles soient suffisamment denses pour que chaque objet 3-D d'altitude constante soit représenté par une seule région et non morcelé,
- peu de bruit (peu d'erreur) : un bruit de corrélation peut être source de sursol (fausse alarme), voire source de sur-segmentation.

Le principe de cet algorithme repose sur la programmation dynamique et est expliqué dans le Bulletin d'Information n° 65. Les résultats obtenus par le processus décrit dans ce même Bulletin obéissent à la première et la troisième propriété, c'est-à-dire qu'ils sont peu bruités et conservent les faces verticales. Cependant, ils ne sont pas denses et les zones d'intérêt extraites souffrent d'imprécision et de morcellement.

On corrige ce défaut en profitant des premiers résultats : bien qu'incomplète, la première image de disparités nous procure un semis statistique de points homologues, à partir desquels nous pouvons modéliser le comportement des radiométries de l'image gauche par rapport à l'image droite. Fort de cette modélisation, une nouvelle corrélation à l'aide d'un jeu de paramètres plus permissifs nous procure une carte d'élévations dense et peu bruitée.

Le comportement approximatif du corrélateur dans les zones d'ombre est corrigé par ailleurs en y favorisant les élévations au sol.

Les résultats obtenus ne sont pas tout à fait denses. En effet il reste des zones non corrélées à l'endroit des occlusions et dans certaines régions réellement problématiques (typiquement, les zones homogènes).

L'ensemble du processus est résumé par le schéma B.2.1 :

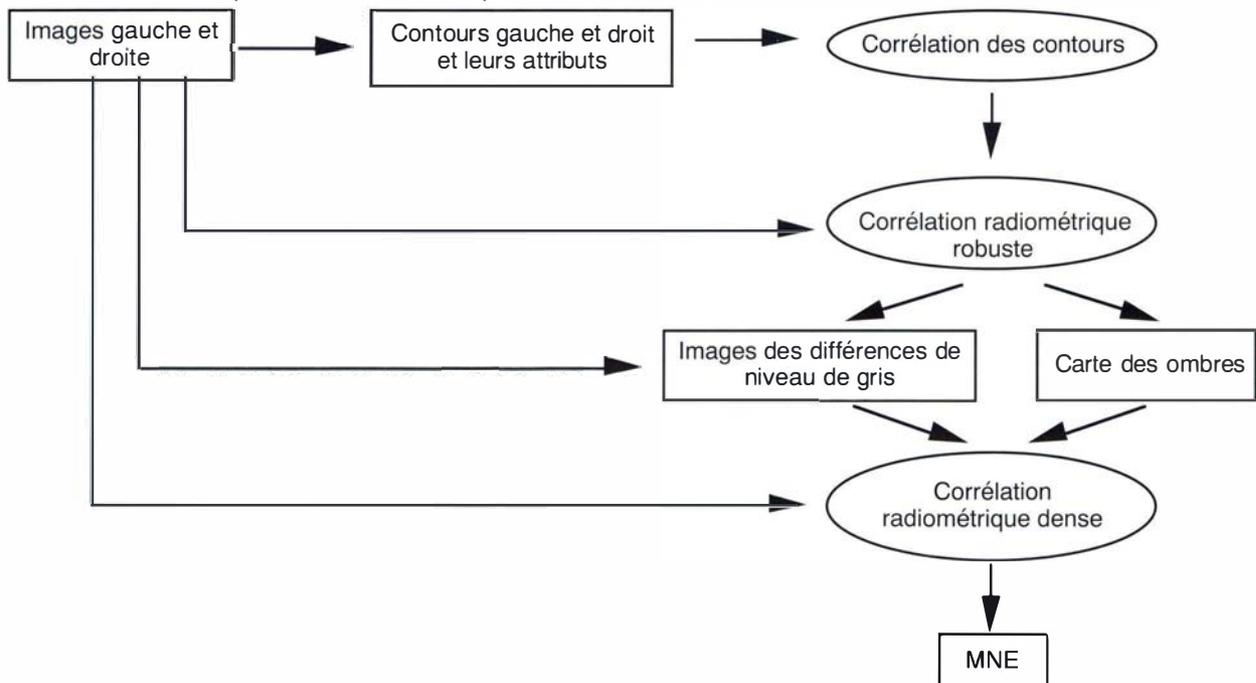


figure B.2.1 : corrélation d'images urbaines stéréoscopiques

Extraction des zones de sursol

Disposant d'une carte dense d'élévations, nous nous assignons la tâche d'isoler les zones de sursol, en accord avec les contraintes typiques des milieux urbains :

- un sursol est une région du MNE d'altitude constante ou variant continûment,
- les zones de sursol peuvent s'imbriquer entre elles (et avec le sol) sur tout niveau de profondeur,
- deux zones de sursol adjacentes mais d'altitudes différentes doivent être séparées,
- deux zones de sursol adjacentes mais d'altitudes différentes peuvent être séparées par une occlusion,
- le sol peut être en pente, c'est pourquoi les altitudes relatives d'un élément de sursol et du sol adjacent peuvent varier sur les frontières.

Pour les calculs de cette étape comme pour l'expression des résultats, on dispose :

- d'un graphe G des régions élémentaires du MNE d'altitude homogène dont les liens entre régions expriment l'adjacence directe ou à travers une zone non corrélée,
- d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) qui représente les élévations du sol. Il est calculé par triangulation de Delaunay à partir des régions du graphe G classées "sol".

Au début, toutes les régions sont classées "sol", on calcule le MNT correspondant. Puis on reclasse les régions du graphe en "sol" ou "sursol" par rapport à ce premier MNT. Un deuxième MNT est déduit de l'ensemble des régions classées "sol". On réitère ce processus jusqu'à stabilité de la classification sol/sursol.

La classification sol/sursol à partir du graphe des régions et du MNT déduit est calculée par un champ de Markov, cela permet de gérer l'imbrication de sursols d'élévations différentes (typiquement séparer les bâtiments des cours intérieures).

L'ensemble du processus est résumé par le schéma B.2.2.

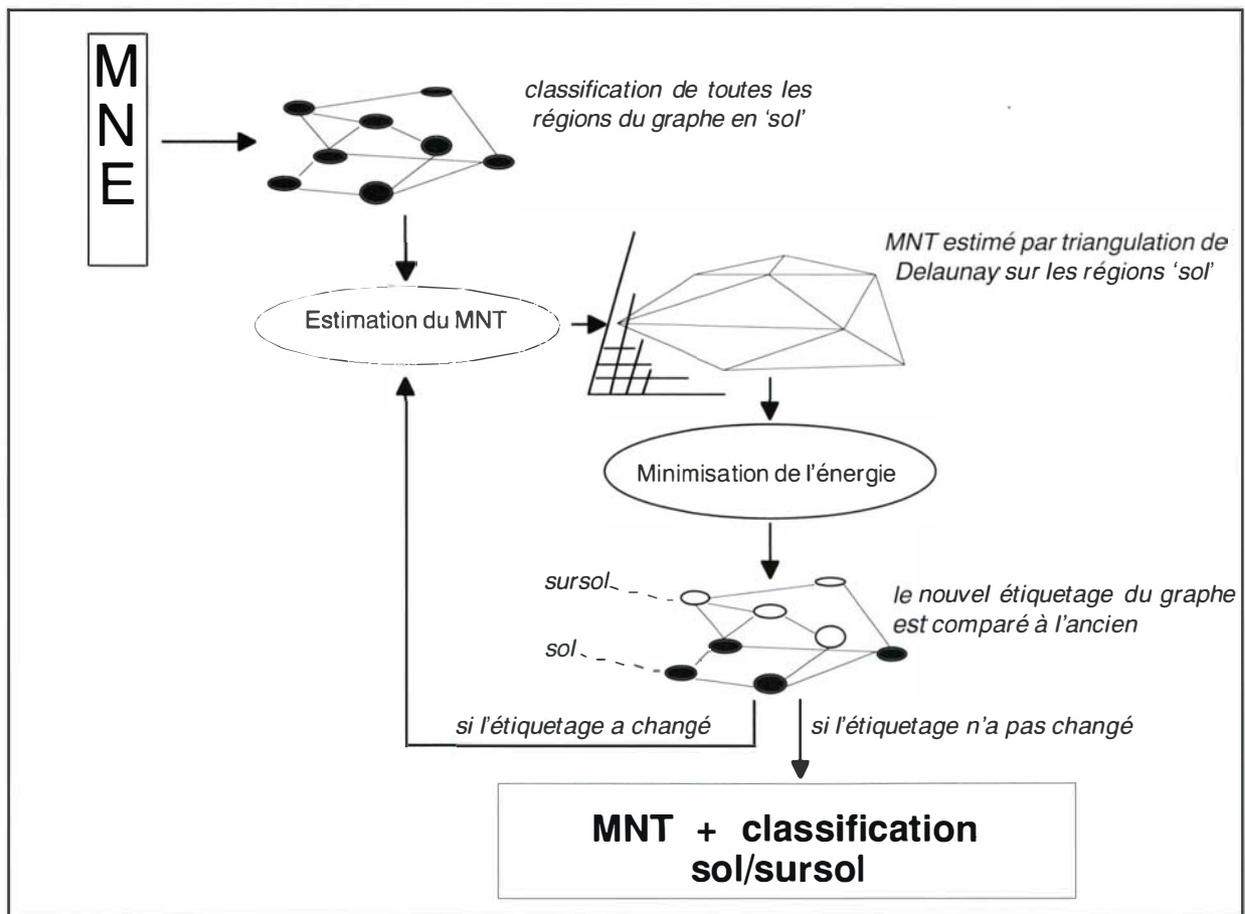


figure B.2.2 : séparation des zones de sol et de sursol, fabrication d'un MNT urbain.

A la suite de ce traitement, toutes les régions du graphe sont classées sol ou sursol. Toutefois un objet du sursol (bâtiment ou arbres) ne se décompose généralement pas en une unique région homogène, mais en plusieurs élévations liées par des contraintes de continuité et de pente. On s'attache alors à regrouper les régions élémentaires classées

sursol entre elles suivant ces critères de continuité et de pente. On obtient ainsi un deuxième graphe G' de zones de sursol.

Caractérisation des zones de sursol

Les zones de sursol obtenues précédemment représentent soit un objet unique du sursol (un bâtiment ou un arbre), soit un ensemble d'objets du sursol adjacents et possédant la même élévation. L'étape de caractérisation des zones de sursol utilise le critère décrit dans le Bulletin d'Information n° 68 [DISSARD 97] qui sépare les pixels de voisinage linéairement structuré (c'est-à-dire dont les gradients des niveaux de gris possèdent une direction préférentielle modulo $\pi/2$) des pixels de voisinage non structuré.

Dans les faits, cela revient à séparer les bâtiments des arbres.

Nous pouvons procéder de deux façons :

- soit nous introduisons ce critère dès la recherche des zones de sursol : chaque région élémentaire du graphe G est classée structurée ou non; nous en tenons alors compte lors du regroupement des régions élémentaires (graphe G) en zone de sursol (graphe G'),
- soit nous partons directement des zones du graphe G' et nous les divisons selon ce critère.

En pratique, chaque procédure possède des avantages et des inconvénients, la première donne des régions plus régulières mais il y a des risques de ne pas séparer un arbre et un bâtiment adjacents et d'exactly la même altitude. La deuxième donne des régions plus morcelées et souvent les intérieurs de toits (présence d'objets ponctuels - cheminées ... - et donc absence de direction préférentielle) deviennent des arbres. Un seuillage supplémentaire sur les niveaux de gris évite généralement ce désagrément.

Résultats, exemples d'applications

Les images B.2.3.a à B.2.4.d illustrent ces travaux et donnent des exemples d'utilisation de ces données, nous les commentons dans leur légende.

Conclusions et perspectives

Dans cet article nous avons présenté une partie des recherches menées au laboratoire MATIS sur l'extraction et la reconstruction des objets 3-D à partir d'images aériennes. Notre travail a consisté à procéder à une première analyse 3-D du relief des scènes urbaines :

- synthèse d'un MNE dense et respectant les contraintes de discontinuité des scènes urbaines,
- séparation des zones de sursol du sol et entre elles,
- synthèse d'un MNT urbain à l'aide des zones au sol,
- caractérisation et découpage de chaque zone de sursol en bâti ou végétation.

Les avantages de cette démarche sont multiples : d'une part, les résultats intermédiaires sont utilisables tels que pour un certain nombre d'applications comme la fabrication d'ortho-images et la visualisation de perspectives urbaines, l'étude de propagation d'onde, ... D'autre part, pour ce qui est encore à l'état de recherche, la focalisation d'attention 3-D est une étape indispensable pour l'utilisation d'algorithmes de reconstruction de bâtiment. Les résultats obtenus semblent confirmer ce point de vue.

La robustesse des algorithmes mis en oeuvre n'est pas tributaire de conditions de prise de vue entièrement figées, les exemples montrés prouvent la constance de leur comportement pour une large plage de résolutions (20 cm à 1 m pour la fabrication du MNE) et de contextes. Enfin, la plupart des paramètres s'expriment sous forme de grandeurs physiques et leurs limites sont exprimables par les conditions de prise de vue.

La qualité des MNE est essentielle pour les étapes suivantes et les principales faiblesses actuelles sont dues pour l'essentiel aux conditions de prise de vue. Aussi les efforts à venir porteront sur l'exploitation de prises de vue en multi-recouvrement axial et latéral et sur l'utilisation des images de la caméra numérique qui devraient nous permettre de lever respectivement les occlusions et les ambiguïtés des zones homogènes. Par ailleurs nous nous intéresserons à l'affinement du MNE par l'analyse conjointe du MNE et des images radiométriques (correction du MNE sur les zones radiométriquement homogènes, recalage des sauts de disparité sur les frontières radiométriques).



figure B.2.3-a : image gauche, vue de Paris, la résolution de pixel est de 42 cm, la zone représente une longueur réelle de 1,5 km.



fig. B.2.3-b : disparités après corrélation (taille de la fenêtre de corrélation : 7×7), les élévations sont exprimées dans le référentiel de l'image de gauche, on peut voir en noir les pixels non corrélés qui sont surtout des occlusions axiales. Certaines rues orthogonales à la direction de vol ne sont pas bien corrélées, on se trouve ici dans un cas où les images gauches et droites sont sources d'occlusions de part et d'autre de la rue et donc sources de confusions.

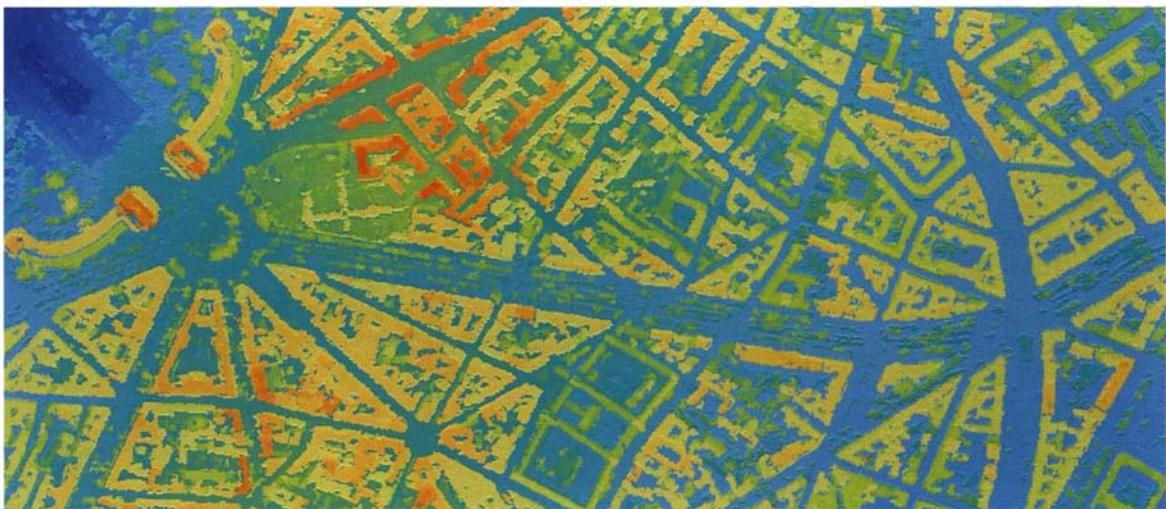


figure B.2.3-c : MNE, l'échelle des altitudes va du bleu profond (élévations basses) au rouge (élévations hautes). Ici les élévations sont exprimées dans le référentiel cartographique (les bâtiments sont redressés), on a comblé les trous de corrélation par les valeurs du MNT calculé lors de la séparation sol/sursol.



figure B.2.3-d : ortho-image au 1 : 10 000ème réalisée à partir du MNE précédent. Les bâtiments sont redressés et les occlusions axiales sont comblées par les niveaux de gris des images gauche ou droite. Par contre, les occlusions latérales (présentes sur les deux images à la fois) ne peuvent être corrigées, les pixels restent en noir (voir les bordures inférieures des rues). Les imperfections du MNE provenant de la corrélation (imprécision des frontières d'environ 2 pixels) ne permettent pas de fabriquer une ortho-image à la même résolution mais à une résolution dégradée d'un facteur d'environ 1/2 voire 1/3.



figure B.2.3-e : vue axonométrique réalisée à partir du MNE et de l'ortho-image.



fig B.2.3-f : zones de sursol classées suivant leur thème (bâti : rouge, végétation : vert) et leur hauteur (du rouge sombre au jaune, du vert sombre au bleu-vert suivant les élévations croissantes). La classification du palais de Chaillot en bâti a entraîné la classification des arbres adjacents et de même altitude en "bâti", une classification par croissance de région aurait évité cela, en revanche, les résultats se seraient dégradés au niveau des toits des pâtés de maisons.



fig B.2.4-a : image gauche

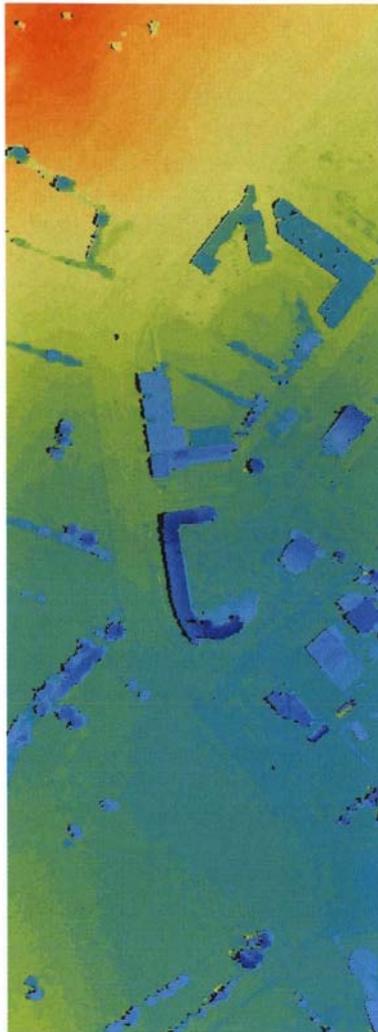


fig B.2.4-b : disparités calculées, le rouge correspond aux élévations le plus basses.



fig B.2.4-c : MNT + sursols colorés aléatoirement.

fig B.2.4 : images de la caméra numérique : contrairement aux images de Paris codées sur 256 niveaux de gris, ces images sont codées sur 4096 niveaux de gris. Elles possèdent en outre un excellent rapport signal/ bruit qui se traduit par une corrélation beaucoup plus propre, notamment au niveau des zones homogènes qui sont des zones à problèmes sur les images classiques et aussi dans les régions d'ombre où l'on distingue plus de détails. Cet avantage est exploité par l'utilisation de fenêtres de corrélation plus petites (3x3 ou 5x5) qui aboutit sur une amélioration de la précision planimétrique.

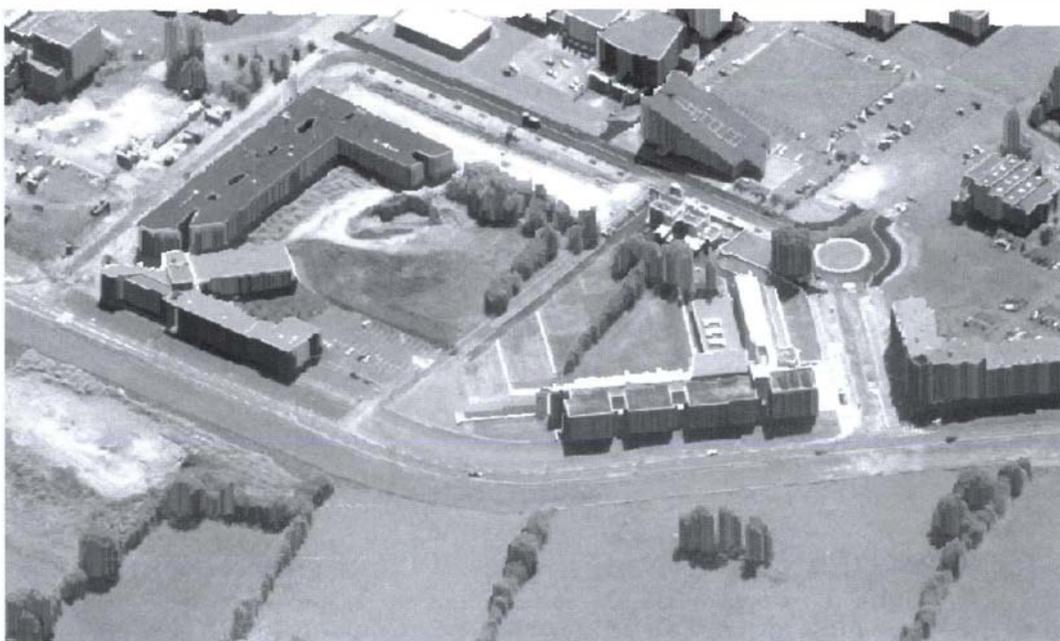


figure B.2.4-d : vue axonométrique

Publications

[BAILLARD 97] C. Baillard : *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains, détection et caractérisation du sursol*, Thèse de doctorat, ENST 97 E 018.

[BAILLARD et al 96a] C. Baillard, O.Dissard, O. Jamet et H. Maître : *Appariement stéréoscopique d'images aériennes en milieu péri-urbain*, in Actes 10ème Congrès AFCET Reconnaissance des formes et intelligence artificielle, Rennes, pages 247- 256, 1996, laboratoire MATIS, IGN-SR 96006/C -COM, 1996.

[BAILLARD et al 96b] C. Baillard, O.Dissard, O. Jamet et H. Maître : *Extraction and characterization of above-ground areas in a peri-urban context*, in Proceedings of the IAPR/TC-7 Workshop on methods for extracting and mapping buildings, roads and other man-made structures from images, Graz (Austria), pages 159-174, laboratoire MATIS, IGN-SR 960019/C-COM, 1996.

[BAILLARD et al 96c] C. Baillard, O.Dissard, O. Jamet et H. Maître : *Extraction of above-ground areas and application to DTM Generation in a urban context. Image and signal processing for remote sensing*, in Proceedings of the European symposium on satellite remote sensing III, SPIE Vol. 2955, Taormina (Italy), pages 129-140, laboratoire MATIS, IGN-SR 960020/C-COM, 1996.

[DISSARD 97] O. Dissard : *Séparation des zones naturelles et construites sur images aériennes*, in Bulletin d'information de l'IGN : la recherche en 96, BI n° 68, pages 33 - 38, 1997/4.

[DISSARD et al. 97] O. Dissard, C.Baillard, O.Jamet et H. Maître : *Above-ground objects in urban scenes from medium scale aerial imagery*, in Proceedings of the Ascona workshop 97 on automatic extraction of man-made objects from aerial and space images II, pages 183-192, laboratoire MATIS, IGN-SR 970018/C-COM, 1997.

[BAILLARD et al 98] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet et H. Maître : *Detection of buildings and vegetation from aerial stereo pairs : a quality assessment*, à paraître dans ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (IJPRS), laboratoire MATIS, IGN-SR 980003/C-ART, 1998.

[DISSARD, BAILLARD 98] O. Dissard et C. Baillard : *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains*, à paraître dans le bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT), laboratoire MATIS, IGN-SR 980004/C-ART, 1998.

B.3 Les images numériques maintenant en couleur

Jean-Philippe Souchon

Résumé

Au début de l'année 1997, le laboratoire OEMI achevait la réalisation d'une nouvelle caméra numérique. Celle-ci a été conçue autour d'un capteur couleur KODAK de 3072 par 2048 pixels (mêmes dimensions que le capteur noir et blanc de la précédente caméra). Du fait de cette similitude entre les deux capteurs, peu de modifications ont dû être apportées à l'ancienne caméra.

Le premier essai en vol de ce nouveau prototype a eu lieu le 10 septembre 1997 sur la ville du Mans. Grâce aux images acquises durant cette mission, nous avons pu mettre au point une chaîne de traitement des images couleur afin d'améliorer leur aspect et leur résolution.



figure B.3.1 : système d'acquisition et nouvelle caméra

Contexte - objectifs

Depuis 1995, le laboratoire OEMI conçoit, construit et met au point des prototypes de caméras numériques basés sur des capteurs matriciels de grand format. Les caméras du commerce ne présentent pas les caractéristiques spécifiques à la prise de vue aérienne (compensation de filé électronique, cadence de prise de vue assez élevée pour permettre un recouvrement de 60%, ...).

Les caméras de l'IGN sont en revanche parfaitement adaptées à cette application. La caméra numérique noir et blanc conçue autour d'un capteur de 3072 par 2048 pixels s'est perfectionnée au fil des missions au point d'être aujourd'hui un outil fiable [THOM, JURVILLIER 96], [THOM, SOUCHON 96]. Nous nous sommes alors dotés du capteur couleur de même format (mais avec la valeur d'une seule des trois primaires rouge, vert, bleu par pixel) proposé par KODAK pour réaliser une nouvelle caméra. Cette dernière peut être équipée d'un capteur, soit noir et blanc, soit couleur. Dans ce cas, elle nous permet de répondre à toutes les applications nécessitant des images numériques couleur de haute qualité, par exemple l'orthophoto numérique couleur. Nous avons bien sûr pour objectif d'acquérir à l'aide de notre

caméra des images couleur présentant une qualité radiométrique supérieure à celle du film numérisé, et si possible comparable à celle des images numériques noir et blanc.

La première mission de cette caméra [THOM, SOUCHON 97a] a révélé divers problèmes rencontrés dans les images acquises avec le capteur couleur, problèmes auxquels nous avons apporté des solutions en vue d'un rendu de nos images à l'écran, conforme à la scène survolée. Pour cela, les images ont subi deux types de traitement : des corrections colorimétriques de l'image brute et un suréchantillonnage de l'image corrigée pour obtenir la même résolution dans les trois plans rouge, vert et bleu que dans une image noir et blanc ayant la même fauchée. Il s'est également avéré que le phénomène de diffusion atmosphérique qui n'était pas gênant lorsque l'on affichait des images noir et blanc ne peut plus être négligé. Nous avons donc utilisé un modèle simple pour mesurer le voile atmosphérique dans les images, puis le corriger [THOM, SOUCHON 97b].

Principales caractéristiques de la nouvelle caméra

Le capteur couleur ayant le même format que le noir et blanc, il n'y a pas eu de grandes modifications à apporter à la caméra déjà existante pour concevoir le nouveau prototype. Toutefois, la caméra réalisée en 1997 apporte des améliorations à l'ergonomie et au système en général. Comme cela a été mentionné plus haut, on peut y installer soit un capteur noir et blanc, soit un capteur couleur, il suffit alors de préciser à l'ordinateur de pilotage dans quelle configuration on se trouve.

Taille de pixel-sol minimum

On a en particulier cherché à diminuer la taille minimale du pixel-sol qui, avec l'ancienne caméra était de 25 cm en 8 bits et 50 cm en 12 bits. Cette limite était fixée par le débit des disques durs sur lesquels les images étaient sauveées (3 Mo/s).

Avec des disques tournant à 10 Mo/s, et une vitesse de lecture du capteur de 8 MHz, la nouvelle caméra permet d'acquérir des images avec une période minimale entre deux clichés légèrement supérieure à 2 s (aux formats 8 et 12 bits) et par conséquent un pixel-sol minimum de 15 cm.

Les nouveaux disques durs, outre une plus grande vitesse, proposent une plus grande capacité de stockage (9 Go chacun).

Caractéristiques radiométriques

Les images noir et blanc acquises avec la nouvelle caméra ont une dynamique un peu plus faible que celles de la précédente (2000 contre 3000 auparavant) mais conservent le même rapport Signal/Bruit de 300. Le capteur couleur introduit une détérioration supplémentaire de la dynamique en raison du drain anti-éblouissement (*anti-blooming*) en profondeur dont il est équipé. Ce dispositif utilise malheureusement une partie de la surface de chaque pixel, et donc réduit la capacité de ceux-ci à accumuler les photo-électrons.

De plus, les images couleur sont plus bruitées que les images noir et blanc, notamment le canal bleu, car le capteur est moins sensible dans cette bande spectrale.

L'optique

Une nouvelle interface a été réalisée pour pouvoir adapter l'ancien objectif 24 mm d'Optique THÉVON mais également des optiques ROLLEI à obturateur central rapide. Nous nous sommes équipés d'un objectif 50 mm de cette marque. ROLLEI propose toute une gamme de focales désormais adaptables sur nos caméras. Le temps de pose minimum avec le 24 mm était de 1/150 s tandis qu'il est de 1/1000 s avec le 50 mm.

Autres caractéristiques

Cette caméra conserve une compensation de filé électronique d'une précision de l'ordre du demi-pixel. Une petite modification du procédé a dû être réalisée par rapport à la précédente caméra, afin de gérer le cas des images couleur où il a fallu envisager le problème en terme de paires de lignes. En effet, la surface du capteur couleur est un entrelacement de lignes RV (répétition de paires de pixels rouge-vert) et de lignes VB (répétition de paires de pixels vert-bleu).

Le format et surtout le poids du système ont été revus à la baisse dans la perspective où on nous demande un jour d'installer notre caméra sur un avion modèle réduit [OLPHAND 98].

Les caractéristiques de nos caméras se trouvent figure B.3.2, la caméra couleur étant décrite dans la troisième colonne (Caméra1 1997).

tableau B.3.2 : les caractéristiques de nos caméras

Caractéristiques	Caméra 1993	Caméra 1996	Caméra1 1997	Caméra2 1997
Taille du DTC*	4096 x 4096	3072 x 2048	3072 x 2048	4096 x 4096
Couleur	non	possible	possible	non
Numérisation	1 MHz, 12 bits	5 MHz, 12 bits	8 MHz, 12 bits	8 MHz, 12 bits
Rapport Signal/Bruit	90	300	300	300
Dynamique	< 500	3000	2000	2000
Période minimale entre deux clichés	20 s	4 s (12 bits), 2 s (8 bits)	2 s, (12 et 8 bits)	5 s (12 bits), 3 s (8 bits)
Pixel-sol min., en stéréo avec vitesse = 100 m/s	1,20 m	50 cm (12 bits), 25 cm (8 bits)	15 cm	25 cm (12 bits), 12 cm (8 bits)
Moyen de stockage et capacité	1 disque dur fixe de 1 Goctet	2 disques durs, 3 Mo/s, 8 Go extensibles (disques amovibles à chaud)	2 disques durs, 10 Mo/s, 20 Go extensibles (disques amovibles à chaud)	2 disques durs, 10 Mo/s, 20 Go extensibles (disques amovibles à chaud)
Compensation de filé	non	électronique, jusqu'à 22 mm/s, précision : 1/2 pixel	électronique, jusqu'à 22 mm/s, précision : 1/2 pixel	électronique, jusqu'à 22 mm/s, précision : 1/2 pixel
Interface GPS pour date et position des sommets de prise de vue	oui	oui	oui	oui
Objectifs	24 mm, 1/150 s min. (Optique Thévon)	24 mm, 1/150 s min. (Optique Thévon)	24 mm, 1/150 s min. (Optique Thévon) 50 mm, 1/1000 s min. (Schneider Super-AngulonPQS)	24 mm, 1/150 s min. (Optique Thévon) 50 mm, 1/1000 s min. (Schneider Super-Angulon PQS)

DTC* : Dispositif à transfert de charges (traduction française de CCD)

La mission sur Le Mans du 10 septembre 1997

But de la mission

Le but de cette mission était double [THOM, SOUCHON 97a] : acquérir des images noir et blanc avec la caméra 24 mm pour le compte du laboratoire MATIS et tester la caméra couleur équipée de l'objectif 50 mm. C'est pourquoi les deux caméras IGN ont été embarquées. Le choix de la ville du Mans a été motivé par le déménagement de l'École Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT) au Mans et par la proposition que nous a faite son directeur Michel Kasser de faire faire des relevés par ses élèves pour connaître les coordonnées des points-terrain (stéréopréparation).

Réalisation de la mission

Trois cents images noir et blanc ont été acquises. Sept bandes ont été parcourues avec un recouvrement de 55% dans le sens longitudinal au sein d'une bande et 60% dans le sens latéral entre les bandes pour obtenir le multi-recouvrement nécessaire aux travaux du laboratoire MATIS. La taille du pixel-sol désirée était de 40 cm, elle a été respectée avec une hauteur de vol de 1100 mètres.

Nous avons réalisé deux axes couleur correspondant à deux des axes noir et blanc à une hauteur de vol de 2200 mètres afin de conserver un pixel-sol de 40 cm avec une focale deux fois plus grande. La comparaison couleur / noir et blanc peut ainsi se faire sur des images quasiment semblables.

Toutes ces images sont au format 12 bits et l'acquisition s'est effectuée à partir de 11 heures (heure solaire locale). Ces images représentent environ 5 Gigaoctets et nous avons donc utilisé les deux disques amovibles. Nous avons également pu vérifier le bon fonctionnement du système en ce qui concerne les tops GPS.

Résultats et enseignements

Les images couleur acquises ainsi sur le terrain confirment les essais en laboratoire : les images brutes d'acquisition n'ont pas un aspect présentable. Elles ont un aspect verdâtre dû au fait que les pixels verts sont plus sensibles que les pixels rouges eux-mêmes plus sensibles que les pixels bleus. D'autres phénomènes de transferts parasites que nous détaillerons plus loin viennent s'ajouter à cela.

Notre manque d'expérience du capteur couleur nous a amenés à légèrement surexposer les images couleur. Le vol sur Le Mans a révélé les conséquences négatives de l'installation d'un drain anti-blooming en profondeur sur un capteur : les pixels saturent plus vite qu'auparavant, et inégalement suivant la couleur.

Mais une fois les images traitées au sein de notre laboratoire suivant le processus décrit dans le prochain chapitre, on peut être très satisfait des résultats de cette nouvelle caméra. Apparemment, l'apport de la couleur est énorme du point de vue de l'impact sur le public, qu'il soit habitué ou non à voir des photographies aériennes couleur. Une mosaïque d'orthophotos numériques couleur doit être réalisée à l'IGN avec vingt et une de nos images et devrait montrer si l'apport du numérique est important ou non dans ce type de réalisation.

Cette mission a surtout mis à notre disposition des images numériques couleur aériennes, sur lesquelles nous avons pu élaborer et tester les algorithmes dont nous allons parler maintenant.

Chaîne de traitement des images numériques couleur

Tout ce qui va suivre pourra être trouvé sous une forme plus détaillée et plus illustrée dans [SOUCHON, THOM 97b]. Notre travail a consisté à détecter tous les paramètres dont il faut tenir compte pour expliquer la différence entre le contenu d'une image couleur brute à l'écran et la scène survolée. Puis nous y avons apporté des solutions en vue d'un rendu le plus proche possible de la réalité, avant de chercher à améliorer l'image en soustrayant le voile atmosphérique par exemple.

Le capteur couleur que nous utilisons fonctionne suivant le même principe que le capteur noir et blanc de 3072 x 2048 pixels. Le constructeur a placé devant chaque pixel un filtre rouge, vert ou bleu. Les différents filtres sont disposés à la surface du capteur comme le montre le schéma suivant.

r	v	r	v	r	v
v	b	v	b	v	b
r	v	r	v	r	v
v	b	

r = rouge; v = vert; b = bleu

Les traitements qu'ont subis les images pour pallier tous les problèmes identifiés sont classés dans deux catégories bien distinctes : les corrections colorimétriques de l'image brute et un suréchantillonnage de l'image corrigée pour obtenir une résolution dans les trois plans rouge, vert et bleu aussi proche que possible de celle d'une image noir et blanc ayant la même fauchée.

Les corrections colorimétriques

Dans un premier temps, nous avons mesuré le courant d'obscurité. Pour cela, nous avons acquis une image numérique codée sur 12 bits sans enlever le cache devant l'objectif. Elle nous donne la valeur à retrancher à tous les pixels des images acquises avec la caméra (cette valeur, principalement due au talon du convertisseur analogique numérique de la caméra, est susceptible de varier et doit donc être en principe remesurée lors de chaque mission).

Les pixels rouges, verts et bleus n'ont pas du tout la même sensibilité à la lumière : en effectuant une image d'un champ uniforme blanc (flatfield) on a pu se rendre compte que les pixels verts ont une sensibilité environ 1,5 fois plus grande que les pixels rouges et environ 2,5 fois plus grande que les pixels bleus. Ces deux coefficients interviendront en tant que coefficients d'égalisation grossière des couleurs.

Nous avons détecté un phénomène de pollution des pixels par les autres pixels. Nous avons pour cela réalisé l'équivalent d'une mire couleur à l'écran composée d'une zone rouge ($R = 255$), d'une zone verte ($V = 255$) et d'une zone bleue ($B = 255$). Nous avons alors acquis plusieurs images de cette mire (14 au total) avec des temps de pose différents allant de 0,1 s à 1 s, avec un pas de 0,1 s puis allant de 1 s à 2 s, avec un pas de 0,25 s. Les valeurs maximales du temps de pose ont été choisies afin de faire saturer les pixels rouges dans la zone rouge et les pixels verts dans la zone verte. Ensuite dans chaque image numérique, nous avons privilégié quatre zones de même taille :

une au centre de la partie rouge de l'image, une au centre de la partie verte, une au centre de la partie bleue et enfin une dans le fond noir sous la partie bleue et assez loin de toute influence des parties colorées. Dans chacune de ces quatre zones, nous avons calculé la valeur moyenne de chacun des quatre types de pixels : R, V1 (vert dans une ligne rouge), V2 (vert dans une ligne bleue) et B. En ôtant à chacune des moyennes les valeurs des moyennes obtenues dans la zone noire, on obtient des graphiques du même type que la figure B.3.3.

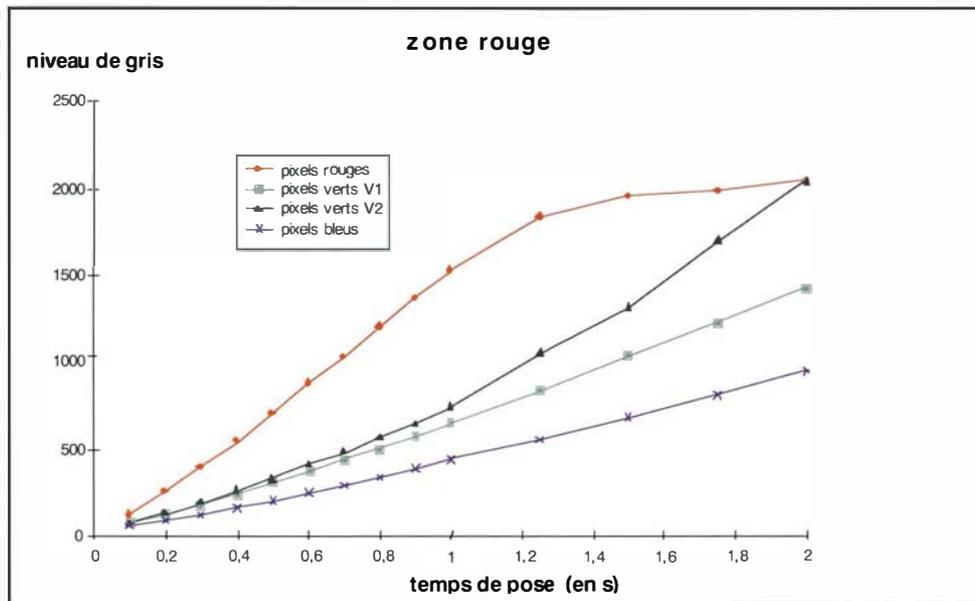


figure B.3.3 : mesures effectuées dans la zone rouge des images

On constate sur cette figure que les pixels rouges, après avoir dépassé une valeur de l'ordre de 1500 (les images sont numérisées sur 12 bits), prennent un écart négatif par rapport à ce que serait une progression linéaire, et ceci au profit des pixels verts se situant dans les colonnes rouges. Le même phénomène est observable dans la zone verte avec une fuite des pixels verts vers les pixels rouges et bleus. Le capteur a donc un défaut : au sein des colonnes des images, lorsque l'on sort de la zone de réponse linéaire au flux de photons incidents, des photoélectrons débordent des pixels ayant dépassé une valeur-seuil vers les pixels voisins (avec un sens de migration privilégié : de haut en bas). Ce phénomène, très variable d'un pixel à l'autre, peut néanmoins être modélisé et partiellement corrigé en mesurant les valeurs moyennes des coefficients d'influence des pixels vers leurs voisins.

Les courbes de la réponse spectrale des trois catégories de pixels du DTC (figure B.3.5 sur la page suivante) montrent que les pixels rouges, verts, bleus sont sensibles aussi dans les couleurs autres que la leur. La matrice de passage des couleurs réelles vers les valeurs mesurées dans l'image a donc été mesurée et son inverse utilisé pour corriger les images et retrouver ainsi une représentation fidèle de la scène vue. Pour faire ces corrections idéalement, il faudrait pouvoir disposer pour chaque pixel des trois valeurs rouge, vert et bleu, brutes; or, évidemment on ne dispose que d'une seule de ces valeurs, celle correspondant au filtre placé devant ce pixel particulier.

Les deux autres valeurs doivent donc être interpolées à partir des pixels voisins. Ceci signifie que la correction colorimétrique pratiquée ici n'est valable que sur des régions relativement homogènes, et pas sur des détails ponctuels.

Puisque tous les pixels ont le même seuil de saturation, les pixels verts saturent plus vite que les pixels rouges qui saturent plus vite que les pixels bleus puisque les sensibilités sont différentes. A l'approche de la saturation les couleurs se trouvent donc dénaturées, et, notamment, après les corrections mentionnées ci-dessus, le blanc prend une teinte mauve assez gênante. Cet effet a été partiellement corrigé.

Les brumes légères (diffusion de Mie) et même l'atmosphère claire (diffusion de Rayleigh) donnent un aspect bleuâtre aux images couleur, coloration surtout sensible dans les zones sombres, les ombres par exemple. On peut dans les images numériques évaluer ce voile, en le modélisant de manière simple, et ce, pour chaque primaire. La valeur mesurée pour le canal bleu est bien sûr la plus grande.

Les images peuvent être par la suite corrigées de cet effet. Cette correction n'est réellement efficace que dans des conditions météorologiques parfaites (pas de nuages). La présence de cirrus par exemple, peut modifier localement ce voile, alors que la correction est globale à une image, voire à une mission.

Une illustration sur le modèle "avant - après" est donnée figure B.3.4 (a et b), pour démontrer les effets de la correction du voile. Il est normal que les ombres conservent un aspect bleuté malgré cette correction, ce n'est qu'une manifestation de la diffusion de Rayleigh : les objets à l'ombre ne sont éclairés que par le ciel bleu qui est une source secondaire de lumière.



figure B.3.4a : extrait d'une image acquise sur Le Mans (pixel-sol de 40 cm) avant correction du voile atmosphérique (gamma : 0,7).



figure B.3.4b : le même extrait après correction du voile atmosphérique (gamma : 0,6).

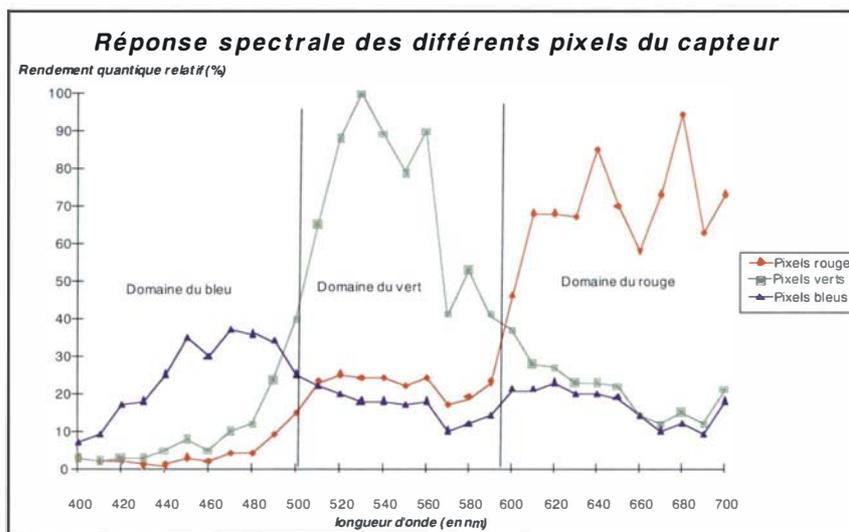


figure B.3.5 réponse spectrale des trois types de pixels du capteur couleur (données livrées par le constructeur).

Lors de l'acquisition, chaque pixel est codé sur 12 bits (soit 12 bits par primaire), ce qui nous donne des images brutes de 12 Mo. Etant donné que la majorité des systèmes utilisent des images couleur codées avec 8 bits par primaire et étant donné qu'une de nos images, avec trois valeurs R,V,B par pixel en 12 bits, occuperait 36 Mo de mémoire, il a fallu passer du format 12 bits au format 8 bits. Ce passage se fait en même temps que les corrections colorimétriques. On se retrouve donc à l'issue de ce traitement avec une image numérique couleur dont les valeurs des pixels ont été modifiées et sont désormais codées sur 8 bits.

Le "suréchantillonnage" des images couleur

Si le rendu des couleurs est bon à l'issue des corrections colorimétriques, le problème de la résolution demeure. Nous disposons d'images couleur de 3072 x 2048 pixels, dont chaque pixel ne possède qu'une valeur des trois primaires codée sur 8 bits. D'après le croquis figurant au début de chapitre, on voit que la résolution est divisée par deux dans les plans rouge et bleu et par $\sqrt{2}$ dans le plan vert par rapport à la résolution d'une image noir et blanc ayant la même fauché. Le but est maintenant d'obtenir pour chaque pixel les deux valeurs de primaires manquantes. Notre souci a été d'éviter d'utiliser une interpolation simple, qui diminuerait la résolution, en nous servant de la forte corrélation existant entre les différents canaux colorés. Ce procédé amplifie évidemment le bruit dans l'image, mais celui-ci étant au départ très faible, le résultat est néanmoins correct. Les images couleur obtenues par ce calcul ont une résolution de 3072 par 2048 pixels et représentent fidèlement le contenu de la scène surveillée. On a d'ailleurs testé un couple suréchantillonné avec un stéréoscope; on voit parfaitement en relief (figure B.3.6). Du point de vue de la taille mémoire, on est passé d'une image de 6 millions de pixels chacun codé sur 8 bits (soit une image de 6 Moctets) à une image composée de trois plans, rouge, vert, bleu de 6 millions de pixels codés sur 8 bits chacun (soit une image de 3 x 6 = 18 Moctets). Les figures B.3.7a et B.3.7b illustrent suivant le modèle avant - après la phase de suréchantillonnage.

ERRATUM

Suite à des problèmes techniques de transmission de fichiers touchant les photographies des pages 22 et 23 de ce Bulletin d'Information, vous trouverez ci-joint ces images telles qu'elles auraient dû être reproduites.



figure B.3.4a : extrait d'une image acquise sur Le Mans (pixel-sol de 40 cm) avant correction du voile atmosphérique (gamma : 0,7).



figure B.3.4b : le même extrait après correction du voile atmosphérique (gamma : 0,6).

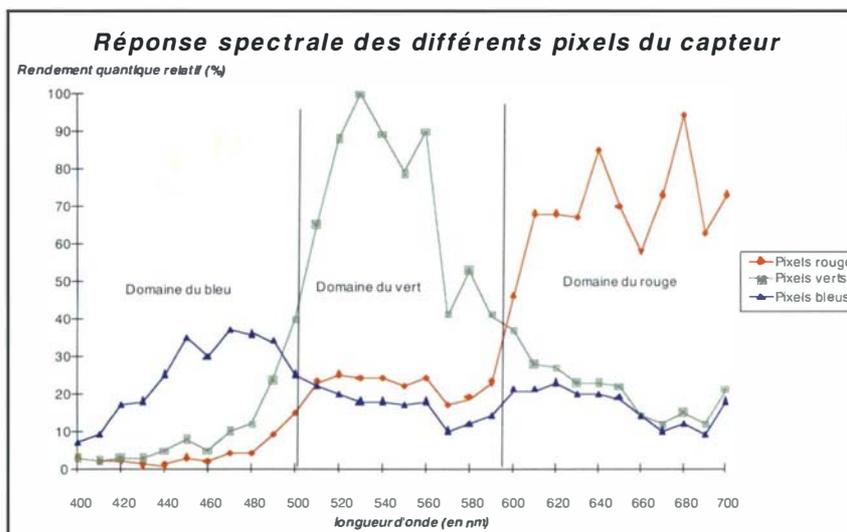


figure B.3.5 réponse spectrale des trois types de pixels du capteur couleur (données livrées par le constructeur).

Lors de l'acquisition, chaque pixel est codé sur 12 bits (soit 12 bits par primaire), ce qui nous donne des images brutes de 12 Mo. Etant donné que la majorité des systèmes utilisent des images couleur codées avec 8 bits par primaire et étant donné qu'une de nos images, avec trois valeurs R,V,B par pixel en 12 bits, occuperait 36 Mo de mémoire, il a fallu passer du format 12 bits au format 8 bits. Ce passage se fait en même temps que les corrections colorimétriques. On se retrouve donc à l'issue de ce traitement avec une image numérique couleur dont les valeurs des pixels ont été modifiées et sont désormais codées sur 8 bits.

Le "suréchantillonnage" des images couleur

Si le rendu des couleurs est bon à l'issue des corrections colorimétriques, le problème de la résolution demeure. Nous disposons d'images couleur de 3072 x 2048 pixels, dont chaque pixel ne possède qu'une valeur des trois primaires codée sur 8 bits. D'après le croquis figurant au début de chapitre, on voit que la résolution est divisée par deux dans les plans rouge et bleu et par $\sqrt{2}$ dans le plan vert par rapport à la résolution d'une image noir et blanc ayant la même fauché. Le but est maintenant d'obtenir pour chaque pixel les deux valeurs de primaires manquantes. Notre souci a été d'éviter d'utiliser une interpolation simple, qui diminuerait la résolution, en nous servant de la forte corrélation existant entre les différents canaux colorés. Ce procédé amplifie évidemment le bruit dans l'image, mais celui-ci étant au départ très faible, le résultat est néanmoins correct. Les images couleur obtenues par ce calcul ont une résolution de 3072 par 2048 pixels et représentent fidèlement le contenu de la scène survolée. On a d'ailleurs testé un couple suréchantillonné avec un stéréoscope; on voit parfaitement en relief (figure B.3.6). Du point de vue de la taille mémoire, on est passé d'une image de 6 millions de pixels chacun codé sur 8 bits (soit une image de 6 Moctets) à une image composée de trois plans, rouge, vert, bleu de 6 millions de pixels codés sur 8 bits chacun (soit une image de $3 \times 6 = 18$ Moctets). Les figures B.3.7a et B.3.7b illustrent suivant le modèle avant - après la phase de suréchantillonnage.



figure B.3.6 : vue en stéréo du Palais des Congrès du Mans (pixel-sol = 40 cm)



figure B.3.7a : extrait d'une image du Mans avant suréchantillonnage (pixel-sol équivalent à 80 cm)

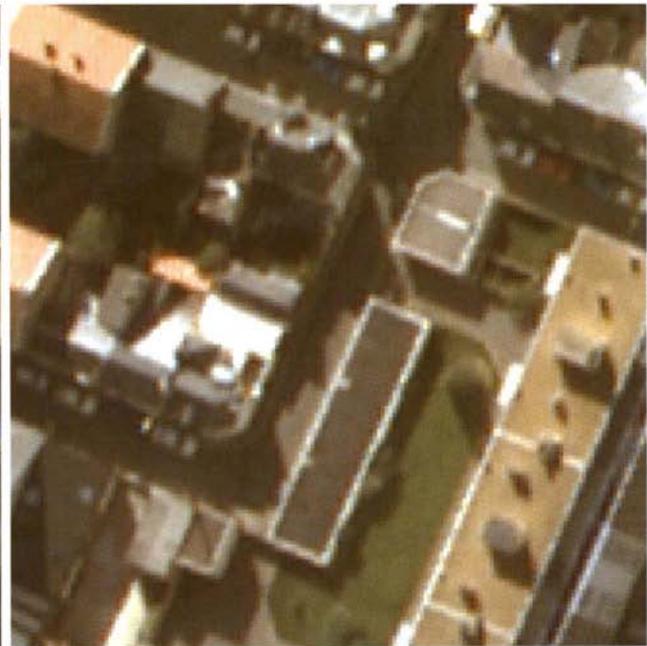


figure B.3.7b : le même extrait après suréchantillonnage (pixel-sol équivalent à 40 cm)

Les limites de nos traitements

Nos traitements ne marchent malheureusement pas avec la même efficacité pour tous les objets au sol : les zones étendues et homogènes sont bien corrigées mais on ne peut pas en dire autant des détails ponctuels, des objets linéaires et des bords de zones. La colorimétrie à haute fréquence (c'est-à-dire pour tout ce qui est détail fin) n'est pas parfaite avec notre processus. Par exemple, un détail ponctuel jaune sur fond vert dont l'image tombe sur un pixel vert de notre matrice ne récupérera pas sa valeur rouge qui en fait un élément jaune (en effet les valeurs rouges voisines sont faibles puisqu'on se situe sur une zone verte). On voit bien dans nos images les problèmes liés aux objets linéaires blancs faiblement inclinés sur la direction verticale ou horizontale de l'image. Ils impressionnent tantôt des pixels rouges tantôt des pixels bleus et apparaissent bicolores malgré nos corrections. Une solution à ce problème résiderait dans des prises de vue volontairement floues : ainsi les ponctuels n'auraient pas une incidence sur un unique pixel mais sur un pixel et son voisinage, on aurait par conséquent toutes les données en main (valeurs de pixels R, V et B) pour lui redonner sa vraie couleur. Il faudra remettre les pixels du cliché flou à leur place avant de leur faire subir les traitements colorimétriques et le suréchantillonnage. Cette solution méritera d'être testée si on veut se servir de notre caméra couleur pour des applications de télédétection. Mais pour l'instant nous disposons d'images couleur présentant des artefacts dans les types de zones à problèmes que nous venons de mentionner.

Mission CNES PPU (Programme Préparatoire à l'Utilisation de SPOT 5)

Une campagne aéroportée du CNES a eu lieu en octobre 1997 afin de réaliser des simulations PPU. Cette campagne avait pour objet de réaliser des prises de vue sur des sites spécifiques couvrant différents thèmes d'application. Le CNES a choisi comme instruments, la caméra IGN, le Push-Broom utilisé auparavant pour les simulations SPOT et un appareil photo numérique du commerce (KODAK DCS460). Les deux caméras IGN équipées d'un capteur noir et blanc ont été embarquées à bord de l'ARAT (Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection) et ont acquis 246 images au pixel-sol de 83 cm sur huit sites différents. Suite à cette mission qui s'est essentiellement déroulée sur le Sud de la France, les deux caméras ont été étalonnées à Toulouse au CERT-DERO. Les résultats de cet étalonnage ne nous sont toujours pas parvenus.

Industrialisation

Nous poursuivons nos contacts avec des industriels éventuellement intéressés par nos prototypes sans obtenir toutefois de résultats décisifs. Nous avons reçu la visite de représentants de chez ZEISS qui, bien qu'intéressés par notre présentation, ne semblent pas vouloir donner de suites à notre entrevue.

Perspectives pour 1998

Nous allons améliorer l'ergonomie du système d'exploitation de la caméra en limitant le plus possible l'intervention humaine durant l'acquisition des images. Ceci devrait permettre dans un proche avenir à un navigateur-photographe d'utiliser nos caméras. La nouvelle caméra équipée du capteur KODAK noir et blanc de 4000 par 4000 pixels est en fin de réalisation et devrait être opérationnelle dès avril 1998. Une mission pour le compte du Service de l'Information Topographique (SIT, IGN) devrait avoir lieu dès que possible avec cette nouvelle caméra. Une feuille de BD TOPO va être survolée et nous réaliserons des prises de vue en parallèle avec une chambre traditionnelle. D'autres missions CNES sont à prévoir suite à la première campagne d'octobre. Elles se dérouleraient en avril, juillet et septembre 1998.

Conclusion

L'apport de la couleur dans nos images numériques est important du point de vue de l'impact sur le public. La production d'orthophotos numériques qui avait été repoussée jusqu'ici en raison de l'absence d'images couleur devrait démarrer si le test sur les images du Mans s'avère concluant. D'autre part, nous avons trouvé un débouché extérieur pour les images noir et blanc avec les missions de simulations PPU du CNES. Au cours de l'année 1997, l'intérêt suscité par nos travaux s'est encore accru à l'intérieur comme à l'extérieur de l'IGN. Celui des industriels reste néanmoins encore mitigé, la question importante à leurs yeux étant évidemment l'étendue du marché pour ce genre de capteur.

Références

[OLPHAND 98] M-P. Olphand : *Les drôles de drones de Georges Dol au service de la photographie aérienne*, in revue Géomètre, page 50, février 1998.

Publications

[THOM, JURVILLIER 96] Ch. Thom, I. Jurvillier : *Compte-rendu de la première mission aérienne de la nouvelle caméra numérique - Amiens*, laboratoire OEMI, IGN-SR 960001/L-RAP, 29 janvier 1996.

[THOM, JURVILLIER 97a] Ch. Thom, I. Jurvillier : *The aerial digital camera project*, in Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, ERIM, Copenhague (DK), 7-10 juillet 1997, vol. 2, pp 243-248, laboratoire OEMI, IGN-SR 970007/L-RAP, 1997.

[THOM, JURVILLIER 97b] Ch. Thom, I. Jurvillier : *An aerial digital frame camera for photogrammetry : radiometric comparison with scanned imagery*, in Geomatica, vol. 51, n° 2 (1997), pp. 133-141, laboratoire OEMI, IGN-SR 970008/L-ART, 1997.

[THOM, JURVILLIER 97c] Ch. Thom, I. Jurvillier : *Current status of the digital camera IGN*, Photogrammetric Week'97, Stuttgart (D), 22-26 septembre 1997, pp 75-82, laboratoire OEMI, IGN-SR 970009/L-RAP, 1997.

[THOM, SOUCHON 96] Ch. Thom & JPh. Souchon : *Compte rendu de la deuxième mission aérienne de la nouvelle caméra numérique - Lyon*, laboratoire OEMI, IGN-SR 960003/L-RAP, 22 juillet 1996.

[THOM, SOUCHON 97 a] Ch. Thom & JPh. Souchon : *Compte rendu de la mission aérienne des caméras numériques de l'IGN sur Le Mans*, laboratoire OEMI, IGN-SR 970011/L-RAP, 10 septembre 1997.

[THOM, SOUCHON 97 b] Ch. Thom & JPh. Souchon : *Chaîne de traitement des images numériques couleur*, laboratoire OEMI, IGN-SR 970012/L-RAP, octobre 1997.

B.4 Premières pistes pour une mise à jour générique des bases de données géographiques

Thierry Badard

Résumé

Souvent abordée dans le cadre des bases de données dites classiques, la mise à jour des bases de données géographiques et donc des systèmes d'information qui s'y rattachent ne va pas sans poser des problèmes particuliers, dus notamment à la spécificité et à la richesse de l'information manipulée, ainsi qu'à l'utilisation qui en est faite. Cet article tente donc de dresser un panorama complet des problèmes liés à ces évolutions nécessaires à leur maintenance et afin d'y apporter des premiers éléments de réponse, la structure générale d'un module générique de mise à jour prenant en compte tous ces problèmes sera également proposée.

Objectifs

De nos jours, les systèmes d'information géographique (SIG) sont devenus de véritables outils d'aide à l'analyse, à la compréhension, à la gestion du territoire ainsi qu'à la planification et à la décision. De ce fait, un nombre croissant d'organisations s'en dotent et y incluent des informations spécifiques, qui peuvent être de natures très diverses, utiles aux missions dont elles ont la charge. Cependant, la mise en place de tels systèmes est difficile et relativement coûteuse. C'est pourquoi ces institutions font appel à des producteurs d'information géographique, afin d'acquérir des données de référence sur lesquelles elles vont appuyer leur système d'information (SI). Ces organisations se placent ainsi, vis-à-vis du producteur, en tant qu'utilisateur de données géographiques de référence.

Cependant, pour pouvoir répondre au mieux aux missions dont elles ont la charge, ces institutions ont un besoin évident de mises à jour de la part du producteur, afin de disposer d'un reflet de l'espace géographique qui soit le plus proche possible de la réalité du terrain tout en conservant bien entendu leurs acquis. Il est à noter qu'un producteur peut avoir des préoccupations proches en voulant reporter les mises à jour de ces données de référence sur ses produits dérivés, afin d'en diminuer les coûts de conception. Mais à l'heure actuelle, cette propagation des évolutions spatio-temporelles du référentiel dans la base de données géographiques (BDG) d'un utilisateur ou dans des bases dérivées ne va pas sans poser des risques importants de perte d'information ou d'obtention d'états incohérents de la base, liés principalement à l'utilisation même qui est faite des données de référence et à la sémantique forte que possède l'information géographique.

Le but de cet article est donc d'apporter des premiers éléments de réponse à ce problème en s'attachant tout d'abord à définir clairement ce que recouvre la mise à jour de données géographiques et à décrire les différents modes de livraison de celle-ci, qui constituent en partie les premières solutions apportées. Une taxonomie des problèmes entravant l'intégration des mises à jour sera ensuite établie. Enfin, la structure d'un module générique de mise à jour des bases de données géographiques sera présentée.

Actions menées

Souvent définie dans la littérature [DELL'ERBA, LIBOUREL 97], sous la forme d'évolutions de schéma et/ou de données, nous déciderons ici de définir la mise à jour dans le cadre des bases de données géographiques sous un angle différent. En effet, même si cela se traduira au niveau de l'implémentation par des modifications de structuration de l'information ou de l'information elle-même, la nature des évolutions possède une réalité physique forte qui induira des modifications dans la base de données qui n'ont pas la même signification. Il nous semble ainsi important de s'attacher aux causes des évolutions, afin de ne pas en perdre le sens, les répercussions dans une base utilisateur ou dérivée en dépendant fortement.

Ainsi, le terme de mise à jour de données géographiques recouvre :

Les évolutions terrain

Ce sont toutes les évolutions qui concernent les entités du monde réel modélisées dans la base de données géographiques. Abondamment traité dans la littérature [CLARAMUNT et al 94], [DELL'ERBA, LIBOUREL 97], [CHEYLAN et al 94], les auteurs ont défini un certain nombre de typologies et s'attachent à répondre à des questions importantes et complexes comme, par exemple, quand considérer qu'une entité géoréférencée est nouvelle ? Ce type d'évolution se traduira au niveau de l'implémentation par des créations, suppressions, modifications d'objets ou d'informations dans la base de données.

Les corrections d'erreurs

Elles correspondent à des corrections du jeu de données fourni lors d'une livraison précédente. Elles viennent donc modifier l'état de la modélisation du monde réel géré afin de refléter au mieux la réalité du terrain. Elles concerneront donc également les objets et l'information contenus dans la base.

Les changements des spécifications

Il s'agit essentiellement de modifications apportées par le producteur de données afin de simplifier ou d'enrichir la perception du monde réel modélisé pour en augmenter la qualité et/ou la richesse. Ils se décomposent en un changement de spécifications de saisie et de contenu. Ils affecteront la base de données non seulement au niveau du modèle conceptuel de données (MCD) mais aussi au niveau des données ou de l'information stockée dans la base.

Les enrichissements de la base

Sous ce terme, nous entendons l'intégration de thèmes non contenus dans la livraison précédente des données géographiques de référence mais aussi l'information provenant de bases de données exogènes qu'un utilisateur a utilisées pour enrichir son système d'information. Il peut également s'agir d'une extension du domaine d'étude. Il ne s'agit donc pas d'évolutions terrain, ni de changements de spécifications à proprement parlé. Ces évolutions toucheront bien entendu la structuration de l'information dans la base (extension du schéma, ajout de relations, ...) mais également l'information elle-même.

Maintenant défini ce que recouvre le terme de mise à jour dans le cadre des bases de données géographiques, intéressons-nous aux différents modes possibles de livraison de ces évolutions qui constituent des premiers éléments d'aide à l'intégration des mises à jour dans une base de données utilisateur. Ces modes peuvent se décliner suivant trois grandes formes :

La base entière mise à jour

On livre ici la base entière mise à jour. Charge à l'utilisateur d'intégrer les mises à jour qu'il est d'ailleurs lui-même obligé de rechercher par comparaison des jeux de données. Il s'agit à l'heure actuelle d'un travail la plupart du temps manuel, long et fastidieux car rapidement combinatoire qui ne peut marcher que dans le cas où les données utilisateurs sont relativement indépendantes du référentiel, c'est-à-dire dans le cas où elles n'ont que peu ou aucune relations, mêmes implicites avec celui-ci. Dans le cas contraire, une intégration brutale de ce nouveau cliché dans sa base entraînerait de la perte d'information ou un état incohérent de celle-ci.

Les différentiels

On ne livre ici que les objets modifiés entre deux états de la base de données, c'est-à-dire entre deux reflets de la réalité. Ces différentiels peuvent prendre deux formes principales :

Les différentiels d'états

Les changements sont fournis dans ce cas sous la forme d'objets nouveaux/anciens ou simplement d'objets nouveaux/références sur les objets anciens. L'utilisateur n'a plus à rechercher les évolutions mais le problème intervient quand celui-ci a modifié le référentiel et a perdu la référence ou n'a pas gardé de trace de l'objet ancien (effacement de l'objet ancien, inexistence de lien entre l'objet ancien et l'objet modifié par l'utilisateur).

Les différentiels d'événements

Ici aussi, seuls les objets ayant évolués sont livrés mais sous la forme d'objet ancien (ou nouveau) et on décrit l'évolution (ou l'évolution inverse) qu'a subie l'objet. Cette forme est riche car elle décrit précisément ce qui est arrivé à l'entité mais elle est lourde et difficile à mettre en place. Elle demande à l'utilisateur de plus un effort particulier de rigueur, en cas de modification du référentiel par celui-ci, dans la description de l'évolution qu'il a fait subir à l'entité. Et les mêmes problèmes que précédemment se posent.

Les journaux

On ne livre ici aucun objet mais seulement la description des évolutions que les objets (repérés par leur référence) ont subies. Cette forme de livraison peut concerner les objets ayant évolués mais également la base entière. De même que précédemment, les problèmes de non conservation des références se posent. D'autre part, cette solution suppose l'existence même de référence, ce qui n'est pas un acquis.

D'autre part, ces formes de livraison de mise à jour sont souvent "déformées" par l'emploi de gestion d'historiques [LANGRAN 92], [SNODGRASS 92], [WORBOYS 94], [RAYNAL 96], du fait de la difficulté à exprimer les évolutions géométriques. Ainsi, les journaux ou différentiels d'événements sont souvent réduits à des listes de relations "succède à", "détruit", "créé", "ancien", Se posent alors des problèmes liés à la gestion du temps. Quel type de temps doit on prendre en compte ? Le temps valide ou de transaction ? Et que veut dire le temps valide ? Est-ce le temps-terrain ou celui du levé ?

Enfin, l'emploi de méthodes souvent mixtes (base à jour + différentiel) permet à l'utilisateur de disposer d'une information plus riche sur les évolutions et peut, le cas échéant, retrouver l'information qu'il aurait pu perdre. Cependant, cela ne résout pas tout, loin de là. On sait certes isoler et livrer la mise à jour mais on ne sait pas l'intégrer, c'est-à-dire propager les effets des évolutions du référentiel sur les données qu'un utilisateur a rajoutées dans son système d'information. La conservation des acquis (cohérence, pas de perte d'informations,...) est loin d'être assurée. Aussi, afin d'appréhender l'ensemble des problèmes pouvant entraver l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques, une typologie de ceux-ci a été réalisée et sera présentée dans la section suivante.

Une typologie des problèmes liés à l'intégration des mises à jour

Au vu de l'utilisation des bases de données géographiques et des modes de livraison des mises à jours, il nous est apparu un certain nombre de "conflits" primaires ne permettant pas d'intégrer facilement celles-ci dans les bases. Cependant, d'autres problèmes plus généraux viennent compléter cette taxonomie. Ils peuvent se classer en trois grandes catégories que nous avons là aussi volontairement formulées en nous attachant aux causes malgré le caractère quelque peu redondant de la forme des problèmes qui se posent.

Les problèmes liés à l'utilisateur de données de référence

Ils peuvent se décomposer en quatre principaux points.

Les modifications des données de référence par l'utilisateur

Lorsqu'un utilisateur dispose d'une forte maîtrise ou est en charge de la gestion des entités du monde réel modélisé dans sa base de données, celui-ci peut être amené à modifier le référentiel. Or, ces modifications peuvent souvent devenir des difficultés supplémentaires pour l'intégration de mises à jour.

En effet, il se peut par exemple que la version "périmée" de l'objet ne soit pas conservée car remplacée par la version modifiée dans le référentiel lui-même ou que si un identifiant (ou référence) externe existe sur les objets, la filiation entre les différentes versions des objets de la base ne soit pas ou mal assurée. La mise à jour peut alors entraîner irrémédiablement de la perte d'information ou un état incohérent de la base.

Une structuration de l'information ajoutée insuffisante

En effet, dans la plupart des SIG réalisés, très peu de liens explicites entre les données de référence et celles que rajoute l'utilisateur sont établis, rendant ainsi très difficile la propagation des mises à jour du référentiel dans la base de données géographiques de l'utilisateur. De plus, cette propagation est rendue encore plus délicate par la nature même de l'information manipulée qui renferme une richesse sémantique implicite.

L'aspect multi-sources de l'information rajoutée

Les différents degrés de "qualité" (dans un sens très large) des données ayant permis l'enrichissement du référentiel pour réaliser la base utilisateur ne va pas non plus sans poser de problèmes. En effet, on peut trouver dans la base utilisateur des données, qui lui sont propres, d'échelles et de précision géométrique différentes, de spécifications variables qui vont poser des problèmes spécifiques lors de la propagation des mises à jour du référentiel sur les données utilisateurs. On pense aux problèmes de fusion, de prolongation de géométrie ou de "mise en conformité" de la base avant toute opération de mise à jour.

L'utilisateur qui devient producteur

La frontière entre producteurs et utilisateurs de données de référence peut devenir moins franche, car ces derniers peuvent se placer à leur tour en tant que producteur de données en communiquant tout ou partie de l'information qu'ils possèdent à d'autres institutions ou voire instaurer un retour vers le ou les producteurs auprès desquels elles ont acquis leurs données de référence. Il se pose alors des problèmes particuliers comme la récupération de la géométrie d'un objet après prise en compte par le producteur tout en conservant l'information sémantique spécifique de l'objet utilisateur.

D'autres difficultés relevant du producteur de données de référence, viennent s'ajouter aux problèmes liés à l'utilisation de celles-ci. Elles vont ici être présentées.

Les problèmes liés au producteur de données de référence

Ils peuvent se décomposer en trois principaux points.

Les modifications de spécifications

Elles peuvent concerner le référentiel lui-même ou la forme des livraisons des mises à jour. Dans le premier cas, il s'agit soit de modifications des spécifications de contenu (exemple : les autoroutes et les routes ne forment plus qu'une seule et même classe dans une terminologie objet) ou de saisie (exemple : augmentation de la longueur minimale d'un arc, ce qui implique la seule modification des instances).

Bien que la plupart du temps documentés, ces changements (ajout, suppression, scission, agrégation de structures et/ou d'information) affectent de façon lourde la structuration de l'information contenue dans la base utilisateur et vont l'obliger à la réorganiser dans sa plus grande partie en établissant de nouveaux liens non seulement entre les classes de son schéma mais aussi entre les objets eux-mêmes (à schéma constant dans le cas de changements de spécifications de saisie).

Le changement des spécifications de la forme des livraisons des mises à jour est un problème en devenir, car actuellement peu de formes différentes de livraison des mises à jour sont mises en œuvre pour les bases de données géographiques. Mais, un utilisateur qui aura développé une méthode d'intégration des mises à jour aura à la modifier à chaque fois que ces spécifications vont évoluer. Il semble donc important de définir une ou des formes qui répondent à des types d'utilisation [SPERY 97].

Les différences de fréquence de mise à jour

Il est compréhensible que sur l'étendue du domaine géré par un utilisateur, les thèmes et certaines zones évoluent à des vitesses différentes, ce qui va induire des degrés de mise à jour différents entre les données, ce qui peut poser des problèmes complexes lorsque ces informations sont en relation avec d'autres données de la base. On risque notamment d'avoir des états transitoires incohérents ou qui ne reflètent pas la réalité. De plus, la connaissance de la validité des différents thèmes sera difficilement transposable pour déterminer celle de l'ensemble de la base.

Le degré de liberté des mises à jour

Dans le cadre par exemple du Cadastre, les évolutions sont fortement contraintes car réglementées par le législateur [SPERY 97]. Leur nombre est donc limité et leurs natures connues à l'avance. Le processus de propagation des mises à jour sur les données utilisateur sera donc *a priori* plus facilement définissable et maîtrisable. Dans le cadre de bases de données géographiques où les transformations sont plus libres, la propagation sera alors plus difficile à appréhender, car on ne dispose que de peu d'informations sur la nature des évolutions subies par les entités modélisées et leurs types sont quasi infinis. La diversité des thèmes et des transformations implique donc une forte maîtrise et connaissance des phénomènes modélisés de la part de l'utilisateur.

Maintenant définis les problèmes liés au producteur de données géographiques de référence, d'autres difficultés liées à l'échange et à la structuration de l'information vont être présentées dans le paragraphe suivant.

Les problèmes liés à l'échange et à la structuration de l'information

Ils peuvent se décomposer en deux principaux points.

La structure même des bases de données géographiques

L'inexistence même d'identifiants stables et fiables dans certaines bases de données géographiques ne va pas sans poser de problèmes. En effet, cela oblige lors d'une mise à jour de la base de données, à livrer celle-ci sous la forme de la base entière mise à jour. L'utilisateur est alors obligé de mettre en place des mécanismes lourds d'appariement [LEMARIE, BUCAILLE 98] pour en extraire les évolutions.

La livraison de différentiel peut être mise en défaut pour les mêmes raisons que citées précédemment. Ceci ne veut pas dire que l'établissement d'identifiants fiables et stables soit la solution : c'est un plus mais il suffit que la gestion de ceux-ci ne soit pas bien assurée et un mécanisme d'intégration uniquement basé sur les identifiants est alors mis en échec.

De l'interopérabilité des systèmes

Certains formats d'échange de l'information ne permettent pas de livrer toutes les formes de mises à jour (notamment les différentiels). D'autre part, si ces formats le permettent, leur gestion est assurée à un niveau attributaire, en livrant des géométries fictives (i.e. : qui n'ont aucune existence physique dans la réalité), ce qui représente un danger pour un utilisateur non averti qui intégrerait brutalement ces mises à jour dans sa base.

Le niveau de structuration de l'information gérée par les systèmes peut également être un handicap. La gestion de la structure de l'information est en effet réalisée à des degrés très divers d'un système à un autre. Certains systèmes par exemple ne gèrent pas de topologie ou le partage de géométrie, ou encore ne permettent pas l'accès aux primitives géométriques. Ainsi, le simple fait que le système gère un niveau de structuration de l'information inférieur ou dégradé entraînera une mise à jour incomplète ou incohérente de la base de données de l'utilisateur.

L'ensemble des problèmes entravant l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques utilisateur ou dérivées ayant été maintenant détaillé, il convient d'y apporter des premiers éléments de réponse à ceux-ci. La section suivante s'attachera donc à présenter notamment la structure générale d'un module générique de mise à jour des bases de données géographiques prenant en compte l'éventail des difficultés exposées précédemment.

Premières pistes pour une mise à jour générique

Des approches comme celles réalisées notamment à l'Institut Géographique Finlandais employant des opérations de généralisation pour déduire les mises à jour à apporter à une base de plus petite échelle [KILPELAINEN 94] ou des règles d'intégrité spatiale étendues [KEMPPAINEN 94] apportent déjà une première vision de ce que pourrait être une méthode générique de propagation et d'intégration des mises à jour.

Cependant, l'avancement des travaux de généralisation et l'impossibilité de gérer des problèmes complexes (mises à jour induites multiples) par des règles d'intégrité étendues, ne permettent pas de l'atteindre. Les études récentes menées au Québec [BEDARD et al 97] qui ont abouti à une structuration forte de l'information de mise à jour (sur les données et non sur les structures pour l'instant) lors des livraisons constituent également une approche intéressante car elle aborde le problème sous un angle différent. Une collaboration avec cette équipe est d'ailleurs engagée.

La définition d'une ou plusieurs formes de livraison des mises à jour en fonction des différents types d'utilisation faits des jeux de données de référence est un autre sujet de recherche étudié en France [SPERY 97], notamment dans le cadre des applications cadastrales. Une collaboration avec cette équipe est également en cours dans le cadre du Programme sur les Systèmes d'Information Géographique (PSIG) du Groupement de Recherche CNRS/IGN CASSINI (GdR CASSINI).

Les travaux réalisés dans le cadre des bases de données (BD) classiques sous la forme de mise à jour de vues [SCHOLL et al 91], [AMER-YAHIA et al 96], ou par l'utilisation de BD déductives ou actives (modèles ECA : Evénement, Condition, Action) [BIDOIT, MAABOUT 96] ou encore de versions de bases de données [BAUZER-MEIDEROS, JOMIER 94] sont difficiles à mettre en place du fait de l'existant et ne répondent pas non plus à la mise à jour telle que nous la concevons. En effet, elles ne prennent pas en compte toutes les opérations de mise à jour et surtout les spécificités de l'information géographique.

Au vu de la taxonomie des problèmes liés à l'intégration des mises à jour que nous avons établie précédemment, il apparaît qu'un certain nombre d'informations, la plupart du temps implicites, sont à extraire ou à restructurer afin de pouvoir assurer une propagation cohérente de celles-ci. Une typologie et une formalisation, qui étend le formalisme proposé dans [BONANNO et al 96], de ces relations indispensables, que nous avons nommées relations de corrélation, ont été établies [BADARD 97]. Cette typologie se décompose en quatre principaux types :

Des relations de composition

Ce sont des relations telles que nous l'entendons dans le sens commun, par exemple une route est composée de tronçons de route. Il s'agit de relations binaires d'ordre partiel (réflexive, antisymétrique, et transitive) sur l'ensemble des entités modélisées dans la base de données.

Des relations de correspondance

Issues des domaines des bases de données fédérées et du multi-échelles [DEVOGELE et al 98], ces relations traduisent la mise en correspondance des entités représentant les mêmes phénomènes du monde réel dans deux représentations de celui-ci. Il s'agit de relations d'équivalence (réflexive, symétrique, et transitive) sur l'ensemble des parties de l'ensemble des objets.

Des relations de nature géométrique

Elles traduisent la notion de partage de géométrie ou de connexion que peuvent avoir certaines entités entre elles afin d'en apprécier les interactions spatiales. Ce sont par exemple, les limites de parcelle qui viennent s'appuyer sur la géométrie de la route ou un réseau de voirie secondaire qui vient se connecter au réseau principal. Ces relations ont d'ailleurs fait l'objet d'une prise en compte récente dans un but de mise à jour des bases de données géographiques notamment dans [LEMON, MASTERS 97].

Des relations de dépendance

Ce sont des relations " classiques " de dépendance attributaire (la géométrie étant considérée comme un attribut) employées dans le cas d'informations déduites par calcul (valeur d'un attribut calculée à partir de celles d'autres objets par exemple).

Il est à noter que ces relations s'établissent entre les deux jeux de données mais également à l'intérieur de ceux-ci et qu'elles peuvent être combinées. Une même instance peut être reliée à une ou plusieurs autres par des relations de types différents.

Cependant, la connaissance et la maîtrise de ces liens, établis non seulement entre les différentes structures de l'information mais également entre les données elles-mêmes, ne nous dispense pas de propager suivant un ordre strict. En effet, la propagation des mises à jour du référentiel, une fois détectées, sur les différentes couches d'information entraînerait des états incohérents de la base car des relations établies entre des couches propres à l'utilisateur, donc non directement reliées aux données de référence, ne seraient ainsi pas prises en compte.

Il convient donc d'intégrer tout d'abord les mises à jour sur le référentiel de l'utilisateur et d'utiliser ensuite les relations établies entre les différentes couches d'informations pour en propager les effets et ainsi maintenir la cohérence, le seul problème étant de savoir gérer ces relations " en cascade ", c'est-à-dire d'ordonner la séquence des couches utilisateur à mettre à jour. Ce problème, derrière lequel se cache, en fait, la richesse sémantique implicite de l'information manipulée est notamment soulevé dans le cadre des bases de données classiques [CORDIER, SIEGEL 94].

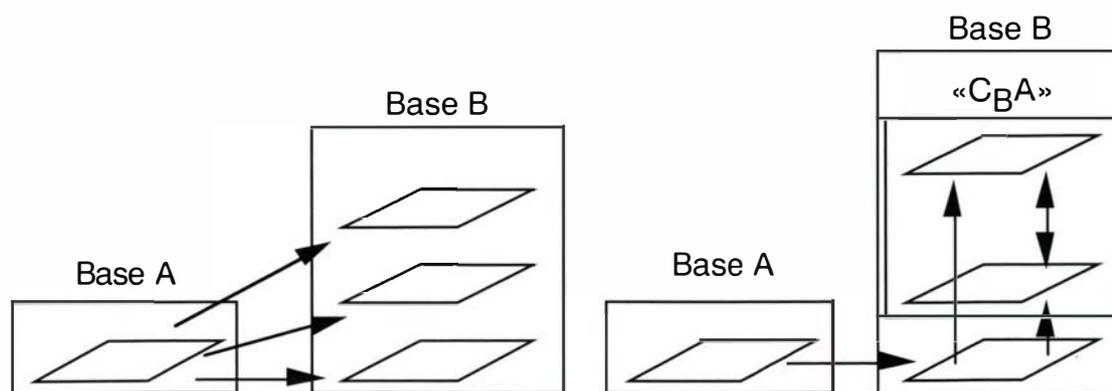


figure B.4.1 : méthodes de propagation des mises à jour

Ainsi, la structure générale d'un module générique de mise à jour des bases de données géographiques telle que nous la voyons, se décompose en quatre étapes principales :

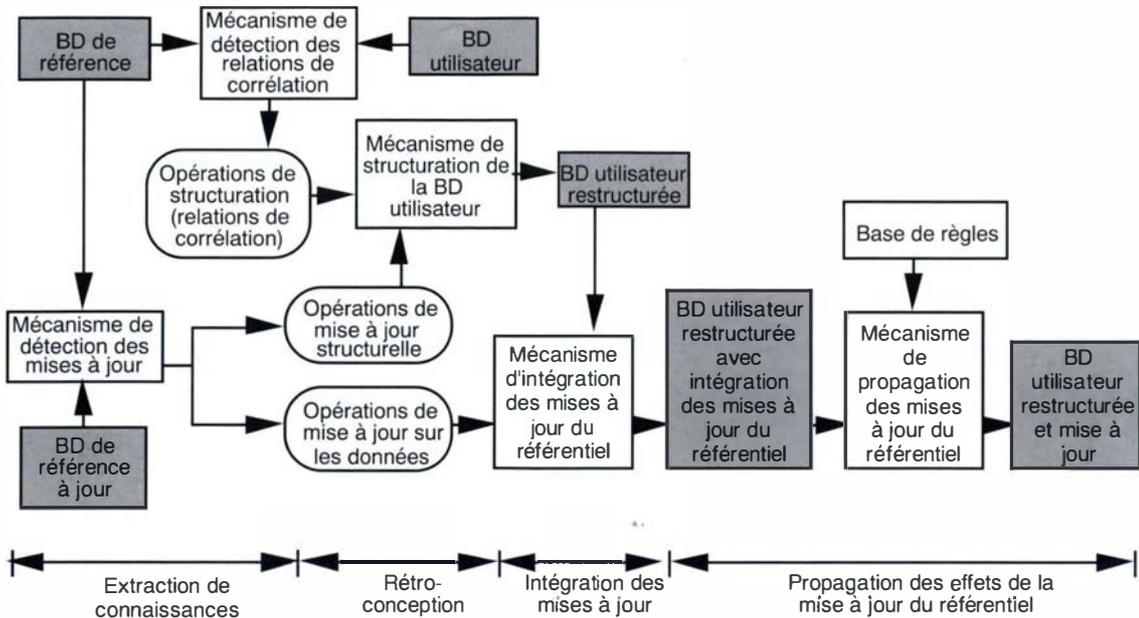


figure B.4.2 : structure générale d'un module générique de mise à jour de bases de données géographiques

Ce module générique qui assure la mise à jour des bases de données géographiques depuis la détection de celles-ci dans les jeux de données de référence jusqu'à leur intégration et la propagation de leurs effets dans les bases de données utilisateur ou dérivées peut être décomposé en quatre grandes phases :

Extraction de connaissance

Dans cette phase, les mises à jour du jeu de données de référence sont détectées et les relations de corrélation sont établies afin d'en déduire les opérations de mise à jour tant sur les données que sur les structures. Les opérations de restructuration de la base utilisateur, liées aux relations implicites qui peuvent exister entre les entités géographiques modélisées, mais qui sont nécessaires à une propagation cohérente et complète des effets des mises à jour en seront également déduites.

Rétro-conception

Lors de cette étape, les opérations de restructuration de l'information sont appliquées à la base de données utilisateur afin d'intégrer les mises à jour structurelles et préparer la base à l'intégration des mises à jour sur les données.

Intégration des mises à jour

Ici, les évolutions du jeu de données de référentiel sont intégrées dans le référentiel de l'utilisateur, qui correspond, aux modifications près apportées par l'utilisateur, au jeu de référentiel précédemment délivré par le producteur.

Propagation des effets des mises à jour

Lors de cette dernière phase, les relations de corrélation précédemment déterminées pour restructurer la base utilisateur sont utilisées pour propager les effets des mises à jour sur les couches d'information ajoutées par celui-ci. Une base de règles sera également mise en action afin d'ordonner et de contrôler la propagation des évolutions.

Le mécanisme de détection des mises à jour s'appuiera, s'ils existent, sur des journaux ou des différentiels ou mettra en œuvre des processus d'appariement (conflation en anglais) [LAURINI, THOMPSON 92], [LEMARIE, BUCAILLE 98] qui permettent de repérer les entités qui modélisent les mêmes phénomènes du monde réel, afin d'extraire les évolutions tant structurelles que sur les données entre les deux états du jeu de référentiel. Ces mécanismes seront détournés, en utilisant l'information sémantique et avec l'aide de méta-données décrivant l'information ajoutée par l'utilisateur, afin d'établir les relations de corrélations. Il est à noter que le côté générique de ce module de mise à jour des bases de données géographiques dépendra en partie de celui des mécanismes d'appariement. Cet aspect fait d'ailleurs l'œuvre de recherches récentes [LEMARIE, BUCAILLE 98].

La phase de restructuration si elle peut entraîner des modifications conséquentes dans le cas de jeux de données ayant des niveaux d'abstractions éloignés (la seule hypothèse faite sur ceux-ci étant que les deux représentations du monde réel présentent des éléments communs), sera relativement restreinte dans le cas où les modélisations sont proches. D'autre part, on évalue à environ 10%, le taux d'évolution annuel des bases de données géographiques [RAYNAL 96]. Ainsi, si la restructuration a déjà été réalisée lors d'une précédente mise à jour, les modifications à apporter lors d'une nouvelle intégration seront minimes.

L'emploi d'une base de règles de propagation permettra de prendre en compte la réalité physique des entités modélisées et de gérer la propagation des mises à jour dans la base de données de l'utilisateur. En effet, si la modification de la géométrie d'une route implique la modification des limites de parcelles qui s'appuient dessus, le détournement du cours d'un fleuve n'entraînera pas forcément la révision d'une limite départementale bien que celle-ci partage à l'origine la même géométrie. De plus, il faut noter que cette base de règles est totalement évolutive. L'utilisateur pourra alors l'enrichir afin de gérer des conflits spécifiques ou liés à l'introduction de nouveaux types d'information dans sa base. Enfin, il semble important de pouvoir quantifier la " qualité " des relations établies, afin de pouvoir indiquer à l'utilisateur les conflits non résolus et qu'il doit alors reprendre manuellement pour finir d'intégrer les mises à jour dans son système.

Dans le cadre de l'action de recherche sur la mise à jour des bases de données géographiques, menée au laboratoire COGIT de l'IGN, une implémentation de ces premiers résultats est actuellement en cours afin d'en évaluer la faisabilité et l'aspect générique. Un premier test concerne la mise à jour de la TOP25 à partir de la BD TOPO (base de donnée à l'échelle du 1 : 25 000 avec une précision métrique). Ces deux bases présentent des niveaux d'abstraction proches car la TOP25 est le produit cartographique directement dérivé de la BD TOPO. L'implémentation en est actuellement au stade de la détection des mises à jour et de leur structuration à partir de l'appariement de deux jeux de données de la BD TOPO présentant des actualités différentes. Les premiers résultats obtenus pour l'instant lors de l'appariement laissent envisager une extraction quasi complète des mises à jour et ceci sans l'utilisation d'un système d'identifiant sur les entités géographiques modélisées ou d'une gestion d'historique sur les données.

Un second test concernant cette fois-ci des bases de données présentant des niveaux d'abstractions plus éloignés est également envisagé. Il s'agira très certainement de la mise à jour de Route500 à partir de la BD CARTO (base de donnée à l'échelle du 1 : 100 000 avec une précision décimétrique couvrant l'ensemble du territoire national), Route500 étant issu de la BD CARTO par généralisation. Les premiers résultats d'appariement entre des jeux de données ayant des niveaux d'abstractions similaires sont très encourageants. Des bancs d'essai avec des jeux de données provenant du Québec et du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement sont également envisagés.

Suite

Une taxonomie des problèmes entravant l'intégration et la propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques a donc été établie et la structure d'un module générique de mise à jour, prenant en compte ces problèmes, a été présentée dans cet article. Le travail à venir va s'orienter vers une étude approfondie des évolutions spatio-temporelles des entités modélisées afin d'en établir une typologie détaillée. Son croisement avec celle des relations de corrélation permettra alors d'en déduire une base de règles de propagation minimale. Les processus d'intégration et de propagation de ces évolutions, ainsi que les types de méta-données nécessaires à notre mécanisme seront également explicités. Les tests sur les différents jeux de données seront aussi poursuivis en parallèle afin de prouver la faisabilité et l'aspect générique de ce module de mise à jour des bases de données géographiques.

Références

- [AMER-YAHIA et al 96] S. Amer-Yahia, P. Brèche & C. Souza dos Santos : *Object Views and Updates*, 12èmes journées Bases de Données Avancées (BDA'96), Cassis (F), 19 pages, 27-30 aout 1996.
- [BAUZER-MEIDEROS, JOMIER 94] C. Bauzer-Medeiros & G. Jomier : *Using versions in GIS*, in Proceedings of the Databases and Expert Systems Applications Conference (DEXA'94), Athens, Greece, 1994.
- [BEDARD et al 97] Y. Bédard, Y. van Chestein & G. Poupard : *Actualisation des données à référence spatiale (volets échange et intégration)*, Centre de Recherche en Géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 54 pages, 1997.
- [BIDOIT, MAABOUT 96] N. Bidoit & S. Maabout : *Une sémantique trivaluée pour un langage de règles de mises à jour*, 12èmes journées Bases de Données Avancées (BDA'96), Cassis (F), 31 pages, 27-30 aout 1996.
- [BONANNO et al 96] N. Bonanno, Y. Lahlou & N. Mouaddib : *Une approche dynamique pour l'identification des liens inter-objets*. *Ingénierie des systèmes d'information*, vol. 4, n° 4, 1996, pp. 439-461, 1996.
- [CHEYLAN et al 94] J.P. Cheylan, S. Lardon, H. Mathian & L. Sanders : *Les problématiques liées au temps dans les SIG*, in *Revue internationale de géomatique*, vol. 4, n° 3-4, pp. 287-305, 1994.
- [CLARAMUNT et al 94] C. Claramunt, M.H. de Sède, R. Prélaz-Droux & L. Vidale : *Sémantique et logique spatio-temporelles*, in *Revue internationale de géomatique*, vol. 4, n° 2, pp. 165-180, 1994.
- [CORDIER, SIEGEL 94] M. O. Cordier & P. Siegel : *Prioritized Transitions for Updates*, IRISA, publication interne n° 884, 13 pages, novembre 1994.
- [DELL'ERBA, LIBOUREL 97] E. Dell'Erba & T. Libourel : *Evolution d'entités géoréférencées*, 13èmes journées Bases de Données Avancées (BDA'97), Grenoble (F), pp. 89-110, septembre 1997.
- [KEMPPAINEN 94b] H. Kemppainen : *Modelling updates propagation in spatial databases*, in *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30 (4), pp. 625-633, 1994.
- [KILPELAINEN 94a] T. Kilpeläinen *Updating multiple representation geodata bases by incremental generalization*, in *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30 (3/1), pp. 440-447, 1994.
- [LANGRAN 92] G. Langran : *Time in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, London (UK), 1992.
- [LAURINI, THOMPSON 92] R. Laurini & D. Thompson : *Fundamentals of Spatial Information Systems*, APIC Series, Academic Press, 1992.

- [LEMON, MASTERS 97] D. Lemon & E. Masters : *The Nature and Management of Positional Relationships within Spatial Databases*, in Proceedings of the 2nd annual conference of Geocomputation'97 and SIRC'97, University of Otago, New Zealand, pp. 15-23, 26-29 août 1997.
- [SCHOLL et al 91] M. H. Scholl, C. Laasch & M. Tresch : *Updatable Views in Object-Oriented Databases*, in Proceedings of the 2nd DOOD Conference, Munich (D), 19 pages, décembre 1991.
- [SNODGRASS 92] R. T. Snodgrass : *Temporal Databases. Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 639, pp. 22-64, 1992.
- [SPERY 97] L. Spéry : *Autour des problèmes de mise à jour*, 1er séminaire SIG et dynamique spatio-temporelle, GdR Mis-Cassini, Montpellier (F), 1997.
- [WORBOYS 94] M. F. Worboys : *Unifying the Spatial and Temporal Components of Geographical Information*, in Proceedings of the 6th International Symposium on Spatial Data Handling, Edinburgh, Scotland (UK), pp. 505-517, 1994.

Publication

- [BADARD 97] T. Badard : *Étude de la propagation des mises à jour dans une base de données multi-représentations par analyse des changements géographiques*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970023/S-RAP, juillet 1997.
- [DEVOGELE et al 98] T. Devogele, C. Parent & S. Spaccapietra : *On spatial database integration*, To appear in the International Journal on GIS (IJGIS), laboratoire COGIT, IGN-SR 980001/S-ART, 1998.
- [LEMARIÉ, BUCAILLE 98] C. Lemarié & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, in Actes du 11ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA'98), volume 2, Clermont-Ferrand (F), pp. 397-406, 20-22 janvier 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980003/S-COM, 1998.
- [RAYNAL 96] L. Raynal : *Some elements for modelling updates in topographic database*, in Proceedings of GIS/LIS'96, Annual Conference and Exposition, Denver, Colorado (USA), pp. 1223-1232, 19-21 novembre 1996, laboratoire COGIT, IGN-SR 960030/S-COM, 1996.

B.5 Généralisation adaptative du linéaire basée sur la détection des empâtements, application au routier

Sébastien Mustière

Résumé

Cet article présente un processus de généralisation indépendante d'une ligne ayant pour but de garantir sa lisibilité tout en respectant au mieux la précision planimétrique et les formes. Cette approche a été appliquée à la généralisation des arcs routiers de la BD CARTO pour la création d'une carte routière au 1 : 250 000.

A l'heure actuelle aucun algorithme ne permet de traiter de manière satisfaisante tous les arcs d'une base de données. Par ailleurs, les principaux problèmes qui apparaissent lors d'un changement d'échelle sont dus à la non-lisibilité des lignes lorsqu'on leur applique une symbolisation à l'échelle finale.

Notre approche consiste à détecter ces conflits de lisibilité, puis à découper la ligne en fonction de ce critère. Un mécanisme adaptatif permet ensuite de déterminer automatiquement le ou les algorithmes appropriés sur chaque portion de ligne en fonction du type de conflit rencontré.

Cet article décrit à la fois les outils mis en place pour la détection des conflits d'empâtement et le processus global qui met en relation le type de conflit et les traitements effectués, et enfin les résultats de cette approche implémentés sur la plate-forme PlaGe du laboratoire COGIT sont présentés.

Introduction

Ces travaux se situent dans le cadre de l'automatisation de la généralisation des objets linéaires d'une base de données pour créer une carte, et plus précisément dans le cadre de la généralisation indépendante du réseau routier; c'est-à-dire la généralisation de chaque arc routier sans tenir compte ni des autres arcs ni des autres objets de la carte.

De nombreux et variés algorithmes de généralisation indépendante du linéaire existent, chacun a sa spécificité et est utile pour effectuer un type d'opération (lissage, diminution du nombre de points, déplacement...) dans un type de géométrie (ligne lisse, sinueuse...), mais aucun d'entre eux ne permet de traiter n'importe quel arc avec un résultat cartographique correct.

Afin de tester la portée et l'efficacité de ces algorithmes de généralisation existants et de mettre en évidence une procédure permettant leur utilisation de manière automatique, le laboratoire COGIT a organisé un test de généralisation de données réelles en collaboration avec différents organismes européens : ICC (E), Laser-Scan (UK), Université de Hanovre (D), Université de Munich (D), Université de Glamorgan (UK), Université d'Edimbourg (UK), Université de Lund (S), dans le cadre de l'OEEPE (Organisation Européenne des Etudes en Photogrammétrie Expérimentale), [RUAS 98].

Ce test consistait à choisir interactivement le ou les algorithmes à appliquer sur les objets d'une base de données pour les généraliser tout en remplissant une grille où étaient notés pour chaque traitement effectué : le type de conflit qui a conduit au besoin de traitement (trop de points, objets trop proches...), le type d'opération effectuée (lissage, caricature...), l'algorithme utilisé, et une estimation de la qualité du résultat.

Une partie de ce test était consacrée à la généralisation du linéaire routier de la BD CARTO vers une carte au 1 : 250 000. Les principaux enseignements de ce test sont les suivants :

- toutes les lignes n'ont pas été généralisées avec le même algorithme : pour un test réalisé par une même personne six algorithmes différents sont utilisés en moyenne et quatorze au maximum. Ceci s'explique par le fait que les traitements sont différents suivant les conflits et les géométries rencontrés; par exemple : une ligne trop détaillée est lissée, une série de virages est écartée s'il y a assez de place sinon un virage est éliminé, un virage de taille moyenne et isolé est élargi pour le mettre en valeur, etc. Aucun algorithme ne répond de manière satisfaisante à tous ces cas de figure à la fois,
- beaucoup de lignes sont traitées par plusieurs algorithmes successivement : en moyenne 30% seulement des arcs ne sont traités que par un seul algorithme. En effet, dans une même ligne plusieurs types de conflits différents apparaissent et beaucoup d'algorithmes n'en résolvent qu'un seul. Par ailleurs le traitement d'un conflit peut entraîner l'apparition de nouveaux conflits qui devront être à leur tour traités,
- les lignes de géométrie complexe sont découpées avant d'être traitées. En effet beaucoup d'algorithmes ne peuvent s'appliquer efficacement que sur des lignes avec une géométrie homogène alors que le découpage des lignes dans un SIG ne se fait pas sur ce critère,
- certains cas ne peuvent être traités en raison de l'absence d'algorithmes adaptés.

Une bonne utilisation des algorithmes de généralisation nécessite donc de focaliser au niveau d'analyse requis pour un algorithme (la ligne entière, une série de virages, un virage) et de bien déterminer quel algorithme appliquer dans chaque cas de figure rencontré.

Cet article décrit comment avancer dans l'automatisation du processus semi-interactif du test OEEPE. Pour cela il est nécessaire de :

- créer un outil de découpage automatique des lignes pertinent pour que chaque partie découpée puisse être traitée de manière indépendante par un ou plusieurs algorithmes (voir chapitre suivant : "Détection et caractérisation d'empâtements"),
- créer de nouveaux algorithmes de traitement locaux des virages (cf. chapitre "Algorithmes de traitement locaux"),
- mettre au point un processus de traitement incluant de manière automatique le découpage des lignes et le choix des algorithmes à utiliser (cf. chapitre "Processus").

Détection et caractérisation d'empâtements

Le but du processus à mettre en place est d'assurer la lisibilité d'une ligne représentée avec un symbole donné tout en conservant au mieux la précision planimétrique et les formes. Les données-test choisies sont des routes de la BD CARTO que l'on veut généraliser pour créer une carte routière au 1 : 250 000.

Le but premier étant d'assurer la lisibilité des lignes, il est tout d'abord nécessaire de définir précisément la notion de lisibilité, puis de déterminer des outils permettant de détecter les zones illisibles.

Définition de la lisibilité

Pour les objets linéaires, nous disons qu'il y a conflit de lisibilité quand il n'est pas immédiat, voire impossible ou trompeur, pour le lecteur de faire la correspondance entre la forme du ruban et l'axe de la ligne qu'il représente (voir figure B.5.1).

Les conflits de lisibilité dans une ligne apparaissent de plusieurs manières :

- Le surplus de bruit introduit par une ligne trop détaillée (figure B.5.1 a). Celui-ci peut sans doute être détecté par une analyse de la sinuosité de la ligne, ou des tailles et répartitions des virages [PLAZANET 96].
- Les superpositions internes du symbole, ou empâtements (figure B.5.1 b-c-d-e). C'est la détection de ce conflit que nous allons détailler ci-après.
- Les intersections non lisibles (comme les intersections en sifflet, figure B.5.1 f). Celles-ci ont été étudiées par [NICKERSON 88] à partir des intersections entre les symboles représentant deux lignes voisines.

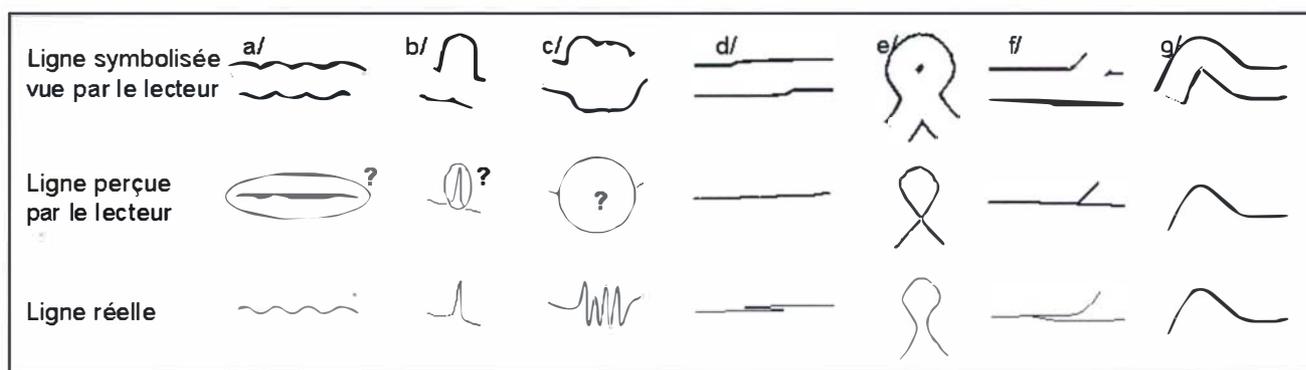


figure B.5.1 : a-b : lecture difficile; c : lecture impossible; d-e-f : lecture trompeuse; g : lecture correcte

Définition de l'empâtement

Pour le lecteur, la ligne représentée par le symbole est intuitivement celle qui passe au milieu des deux bords du symbole. Si ces deux bords sont bien parallèles la détermination de l'axe est sans équivoque (cf. figure B.5.1 g).

Ce n'est cependant pas une condition nécessaire car le cerveau est capable de corriger des écarts à cette règle (cf. figure B.5.2).

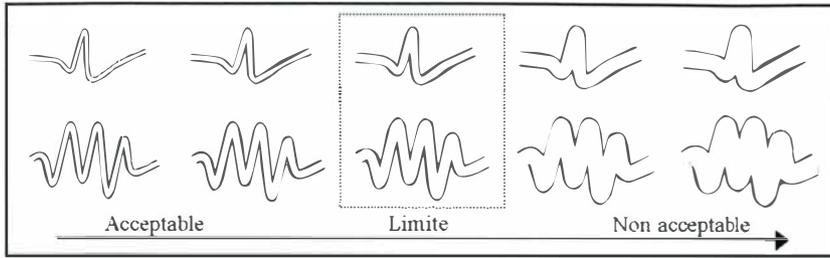


figure B.5.2

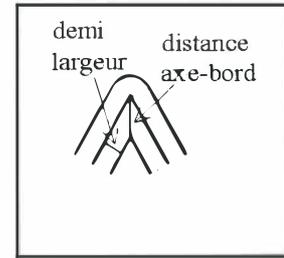


figure B.5.3

Nous avons présenté à différents lecteurs des lignes symbolisées et leur avons demandé quelles lignes étaient facilement lisibles, nous avons constaté que lorsque les bords du symbole s'éloignaient trop l'un de l'autre et donc s'éloignaient trop de l'axe réel du symbole la lecture devenait difficile ou trompeuse. Nous définissons alors l'empatement comme un écart trop important de l'axe de la ligne aux bords du symbole (cf. figure B.5.3)

La limite de ce qui est acceptable peut sans doute être précisée grâce à des tests de lecture de carte mais dépend aussi beaucoup de critères esthétiques, critères aussi difficile à définir que subjectifs. Pour cette étude, nous avons étudié empiriquement quel écart peut être considéré acceptable et avons fixé à 1,7 fois la demi largeur du symbole la limite tolérable de la distance de l'axe au bord du symbole pour assurer une bonne lisibilité (cf. figure B.5.2).

Traduction géométrique de la définition de l'empatement

Soit L une polygline orientée dans le plan euclidien et l_s un réel donné. L est constitué d'un ensemble de segments orientés $\{S_i\}$. Soit $S_i \in \{S_j\}$, on définit $G_i = \text{Bord_gauche}(S_i)$ lieu des points à distance l_s et à gauche de S_i , comme dans la figure B.5.4 a (G est constitué de deux quarts de cercle et d'un segment).

On définit ensuite B_g comme l'ensemble des points de l'union des G_i à gauche de L et à distance de L exactement égale à l_s . B_g représente en fait le bord gauche du symbole, c'est une partie de la frontière de la dilatation de L par une boule de rayon l_s .

B_g est donc constitué d'un ensemble de segments et d'arcs de cercles et possède un nombre fini de points de rebroussement $\{P_i\}$ (en effet un point de rebroussement ne peut se situer qu'à l'intersection de deux éléments de l'ensemble fini des G_i); notons que B_g n'est pas nécessairement connexe (cf. figure B.5.5).

Chaque P_i se projette en un ou plusieurs points sur L qui constituent $\{Q_i\}$ que l'on classe dans l'ordre de parcours de L . Soient alors Q_i et Q_{i+1} deux points consécutifs sur L , issus des projections de P_{i_0} et P_{i_1} . On note L_i la partie de L entre Q_i et Q_{i+1} , et B_{g_i} la partie de B_g entre P_{i_0} et P_{i_1} (éventuellement confondus). Soit D la demi distance de Hausdorff de L_i vers B_{g_i} ($\max_{P \in L_i} \{ \text{distance}(P, B_{g_i}) \}$) et soit $l_{\max} = 1,7 \times l_s$.

On considère alors trois cas :

- si P_{i_0} et P_{i_1} font partie de deux composantes connexes distinctes de B_g (exemple P_3 et P_4 issus de Q_5 et Q_6 dans la figure B.5.5) on dit alors que L_i est en conflit de superposition à gauche vis-à-vis de l_s (le symbole contient un "trou"),
- sinon, si $D \geq l_{\max}$, alors L_i est en conflit d'empatement à gauche vis-à-vis de l_s (exemple : entre Q_1 et Q_2 , tous deux issus de P_1 , dans la figure B.5.5),
- sinon L_i n'est pas en conflit à gauche vis-à-vis de l_s .

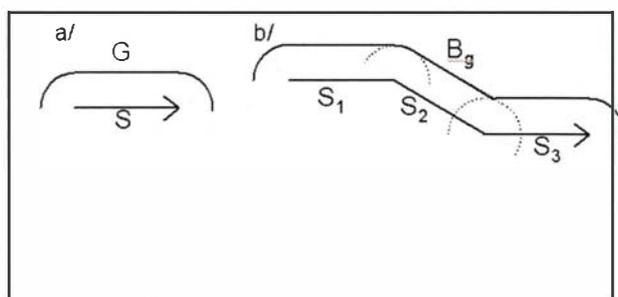


figure B.5.4

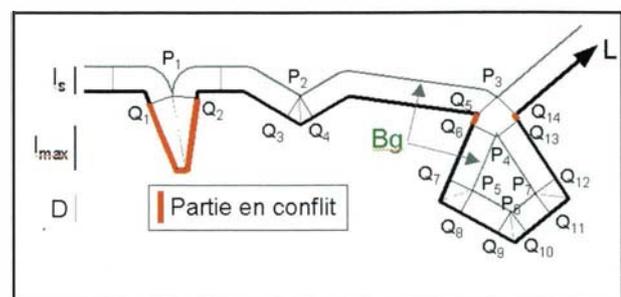


figure B.5.5

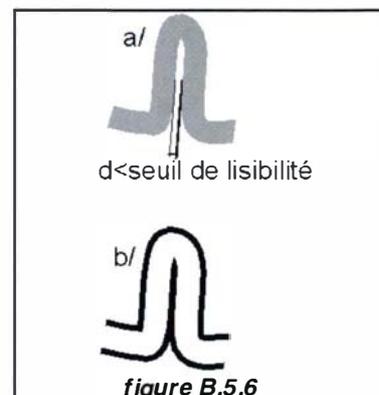
On définit bien sûr de même, les zones d'empatement à droite, et on peut donc découper L en zones sans conflit et en zones avec conflit (qu'il soit à gauche, à droite ou des deux côtés).

Application à une symbolisation cartographique

On a donc défini l'empâtement vis-à-vis d'une distance l_s . Reste à déterminer l_s afin de rendre compte de l'empâtement pour une polyligne représentée avec un symbole donné à une échelle donnée. On rencontre principalement deux types de symboles pour le linéaire : les symboles bordés et non bordés.

Pour un symbole non bordé : l_s est égal à la demi largeur du symbole plus la moitié du seuil de séparation entre deux lignes parallèles (estimé en général à 0,2mm-papier); ceci permet de détecter l'empâtement des formes comme celle de la figure B.5.6a, où les deux parties du virage sont bien distinctes en théorie mais pas assez séparées pour que l'œil les perçoive comme tel.

Pour un symbole bordé : l_s est égal à la demi largeur interne (sans le bord noir, "le couteau") du symbole plus la demi largeur du bord noir; ceci afin de ne pas détecter comme empâtées les formes comme celle de la figure B.5.6 b, où le bord noir des deux parties du virage se recouvrent exactement.



Caractérisation de l'empâtement

La détection ci-dessus permet de découper une polyligne vis-à-vis de son empâtement, mais fournit aussi une première qualification de ces zones découpées en trois cas :

- absence de conflit,
- présence de conflit d'un seul coté. On se trouve alors très souvent dans le cas d'un seul virage très serré,
- présence de conflit des deux cotés. On se trouve alors très souvent dans le cas d'une série de virages en lacet.

Commentaires sur la technique employée

Cette méthode a été implémentée dans la plate-forme de généralisation PlaGe du laboratoire COGIT et testée sur des données réelles, elle correspond bien à la notion intuitive de zones lisibles et illisibles.

Cette détection des conflits de lisibilité prolonge les travaux de [PERKAL 66] basés sur un principe de boule roulant le long d'une ligne et abondent dans le sens de [BEART 91] qui argumente pour une étude des formes du symbole (en tenant aussi compte des seuils de lisibilité) plutôt qu'une étude de l'axe de la ligne.

Algorithmes de traitement locaux

Beaucoup d'algorithmes de généralisation ont été conçus pour fonctionner sur une ligne entière et sont donc peu adaptés au traitement très local d'un virage. Ceux-ci ne paraissent en effet pas utiles dans un processus automatique à cause de l'absence d'algorithme de segmentation efficace; c'est pourquoi les efforts de recherche à l'IGN se sont plus portés d'une part sur des algorithmes globaux et d'autre part sur l'approche présentée dans cet article.

Le test OEEPE a mis en évidence la limite de ces algorithmes globaux pour traiter les lignes non homogènes. La méthode de découpage en fonction des empâtements décrite ci-dessus nous permet maintenant d'envisager un traitement local, et deux algorithmes agissant au niveau d'un virage et qui s'étaient révélés manquants lors du test OEEPE ont alors été mis au point.

Ouverture maximale

L'algorithme "ouverture maximale" est basé sur le concept de dilatation morpho-mathématique. Il calcule le lieu des points situés d'un même coté et à distance constante de la ligne originale. Il permet donc d'élargir le virage tout en conservant la forme (cf. figure B.5.7).

De manière à assurer la précision planimétrique du virage, on fixe la taille de la dilatation à la demi largeur du symbole final moins la demi largeur du symbole à l'échelle initiale des données, on garantit ainsi que dans la plupart des cas le symbole initial sera recouvert par le symbole final.

D'un point de vue algorithmique, cet algorithme fonctionne comme la création du bord dans la figure B.5.4.

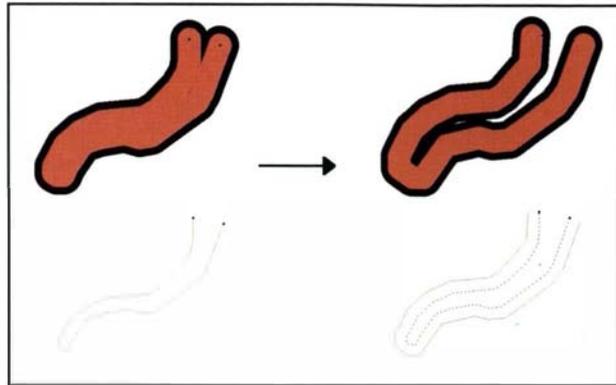


figure B.5.7 : "ouverture maximale"

Ouverture minimale

Le but de cet algorithme est d'élargir le virage au minimum nécessaire pour assurer sa lisibilité; pour cela il imite le processus cartographique manuel qui consiste à faire se superposer le bord intérieur du symbole (cf. figure B.5.8).

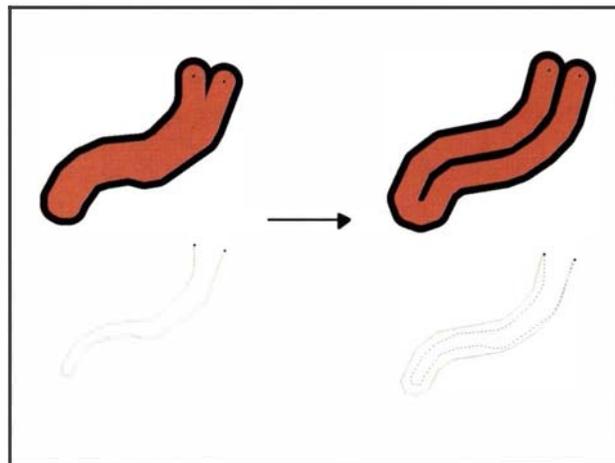


figure B.5.8 : "ouverture minimale"

Il fonctionne comme suit :

- Une triangulation de Delaunay est calculée sur les points de la polygline représentant le virage (cf. figure B.5.9 b).
- De cette triangulation ne sont conservés que les triangles à l'intérieur du virage (cf. figure B.5.9 c).
- Un graphe squelette du virage est alors calculé en reliant deux à deux les milieux des cotés des triangles voisins en passant par le barycentre du triangle si celui-ci a trois voisins (cf. figure B.5.9 d).
- On retient comme "arc squelette du virage", le chemin le plus long parmi les chemins reliant deux extrémités de ce graphe (cf. figure B.5.9 e).
- Cet arc squelette est ensuite dilaté à gauche et à droite selon le même principe que l'algorithme "ouverture maximale" pour fournir la caricature du virage (cf. figure B.5.9 f). La taille de la dilatation appliquée est égale à l_s décrit au paragraphe "Application à une symbolisation cartographique" ci-dessus, ce qui permet une superposition exacte du bord intérieur du symbole (sauf dans le cas rare où l'arc squelette a une courbure trop forte) .

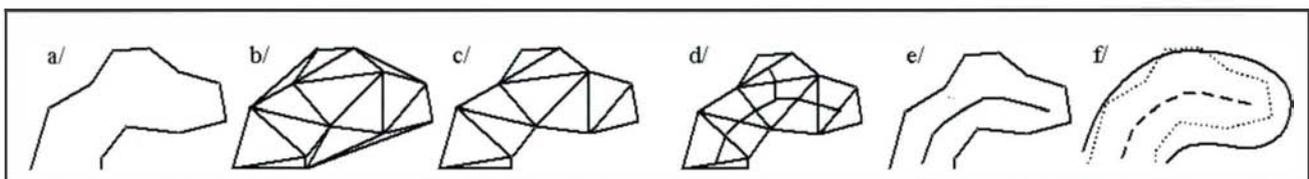


figure B.5.9

Comparaison des deux algorithmes

Pour les deux algorithmes, la lisibilité du virage est assurée. Cependant, l'algorithme "ouverture maximale" conserve mieux la forme initiale du virage que l'algorithme "ouverture minimale" puisqu'il permet de rendre compte d'une éventuelle dissymétrie alors que pour ce dernier les deux moitiés du virage sont nécessairement parallèles. Par contre l'emprise occupée par l'arc traité par l'algorithme "ouverture minimale" est moins importante que celle du même arc traité par l'algorithme "ouverture maximale". On préférera donc utiliser l'algorithme "ouverture minimale" lorsque l'environnement du virage est trop dense pour permettre une dilatation importante du virage et l'algorithme "ouverture maximale" sinon.

Processus global

Cette partie décrit comment les outils présentés ci-dessus sont utilisés dans un processus global qui permet de généraliser une ligne en l'analysant et la traitant à plusieurs niveaux (la ligne entière, les ensembles de virages qui créent des zones empâtées, les virages un à un, et enfin la ligne entière à nouveau) et en déterminant les algorithmes à utiliser en fonction des configurations rencontrées.

Première étape : analyse globale, décomposition

La première étape du processus consiste à analyser de manière globale la ligne afin de déterminer si celle-ci est homogène vis à vis de la présence de conflits. Si ce n'est pas le cas la ligne est alors découpée en portions homogènes par la méthode décrite au chapitre "Détection et caractérisation d'empâtements" (figure B.5.10).

Deuxième étape : traitement des portions homogènes

Chaque zone homogène est ensuite caractérisée, et en fonction de cela chaque zone est traitée de manière différente (figure B.5.11) :

Sur une zone sans empâtement

C'est le cas le plus simple, il faut simplifier la forme afin de diminuer le bruit lié au surplus de détail. Nous appliquons alors un lissage gaussien (paramètre σ fixé à cinquante mètres-terrain, ce qui correspond grossièrement à l'élimination des virages de longueur inférieure à cinquante mètres).

Sur une zone où l'empâtement apparaît d'un seul coté de la ligne

Cela correspond à un seul virage très serré, il faut donc l'agrandir de manière à le rendre lisible. Le virage étant isolé nous disposons de place autour du virage, nous appliquons donc l'algorithme "ouverture maximale" qui caricature le virage en élargissant son emprise. La détection d'empâtement nous indique de quel coté la ligne est empâtée, c'est donc bien sûr de l'autre coté que la ligne est décalée.

Sur une zone où l'empâtement apparaît des deux cotés de la ligne

Nous sommes dans le cas d'une série de virages en lacets, en général alignés; ceux-ci sont traités dans leur ensemble par l'algorithme accordéon [LECORDIX, PLAZANET 96] [LECORDIX et al 97], qui écarte les bases des virages. C'est un algorithme de caricature d'une série de virages qui détecte la droite de régression des points d'inflexions de la série de virages et écarte tous les virages dans cette direction (paramètres σ et ε fixés à 130 mètres et 30 mètres, c'est-à-dire prise en compte des virages de longueur supérieure à 130 mètres pour déterminer les points d'inflexions et élargissement de la base des virages de 30 mètres).

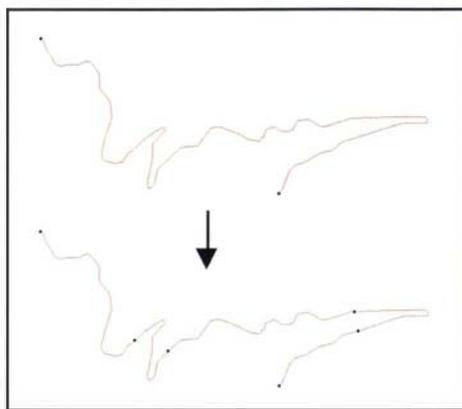


figure B.5.10 : premier découpage

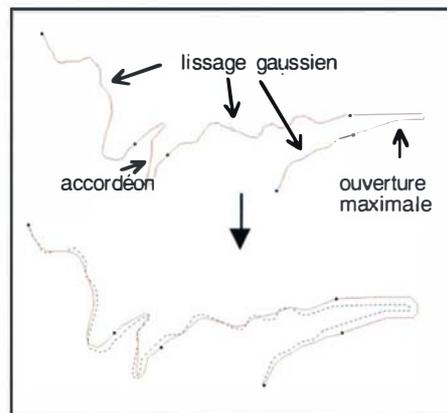


figure B.5.11 : traitement local

Troisième étape : analyse locale, décomposition

Si lors de la deuxième étape on se situe dans le cas d'une série de virages empâtés, l'algorithme accordéon a résolu l'empâtement à la base des virages mais certains d'entre eux peuvent être encore empâtés à leur sommet. Néanmoins les conflits sur les différents virages sont maintenant bien distincts. Une nouvelle segmentation par les conflits d'empâtement est alors réalisée pour déterminer le lieu de ces conflits isolés (figure B.5.12).

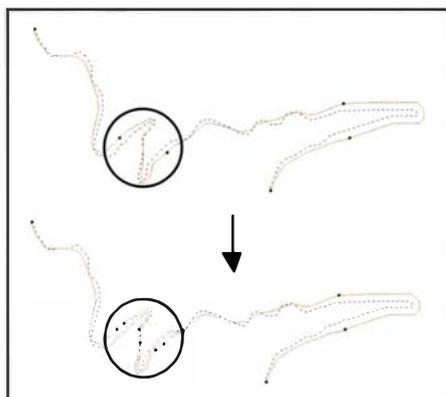


figure B.5.12 : deuxième découpage

Quatrième étape : traitement très local

Les virages détectés empâtés dans la troisième étape doivent être caricaturés mais comme ceux-ci font partie d'une série de virages proches ils doivent être caricaturés en minimisant leur emprise pour ne pas créer à nouveau des conflits entre eux. Pour cela, on leur applique l'algorithme "ouverture minimale" (figure B.5.13).

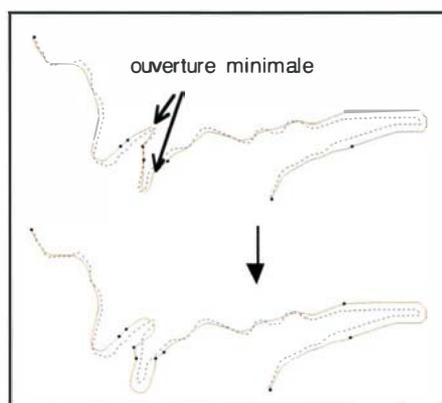


figure B.5.13 : traitement très local

Cinquième étape : traitement d'ensemble

Les arcs ont donc été découpés de nombreuses fois; en raison de la résolution des données et des hétérogénéités de traitement des différentes parties, cela a créé de nombreuses petites inflexions au niveau des points de raccord. Ceci est corrigé en recollant les différentes parties découpées et en appliquant de manière globale un très léger lissage, qui n'aura un effet significatif qu'au niveau de ces petites inflexions accidentelles (figure B.5.14).

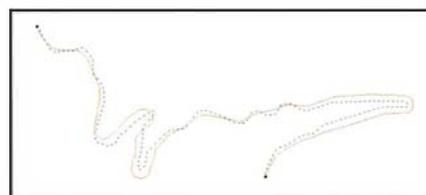


figure B.5.14 : traitement d'ensemble

La figure B.5.15 montre les résultats du processus sur l'arc qui a servi d'illustration dans ce chapitre :

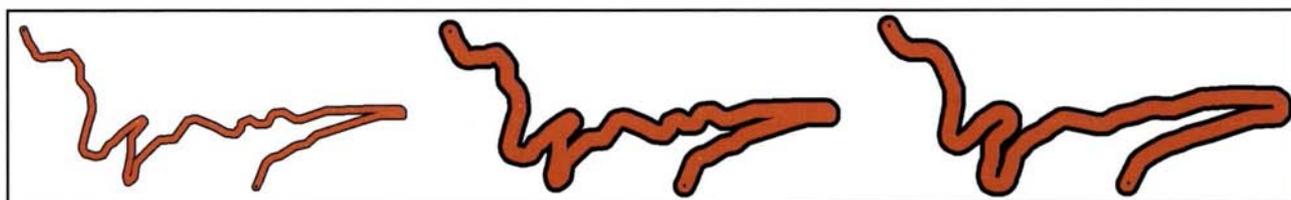


figure B.5.15 : arc original symbolisé au 1 : 100 000 et 1 : 250 000; arc traité symbolisé au 1 : 250 000

Résultats

Extrait des résultats

Les algorithmes et le processus décrits sont implémentés en ADA dans la plate-forme PlaGe du laboratoire COGIT.

La figure B.5.16 (les images proviennent de copies d'écran) compare les résultats de l'approche présentée (en bas à droite) avec les données originales, avec un lissage et filtrage des données (les seuls outils que fournissent les SIG classiques) et avec un traitement par l'algorithme Plâtre [FRITSCH 97] (algorithme de lissage et de caricature). Rappelons que le but de ce processus est de traiter les arcs indépendamment les uns des autres.

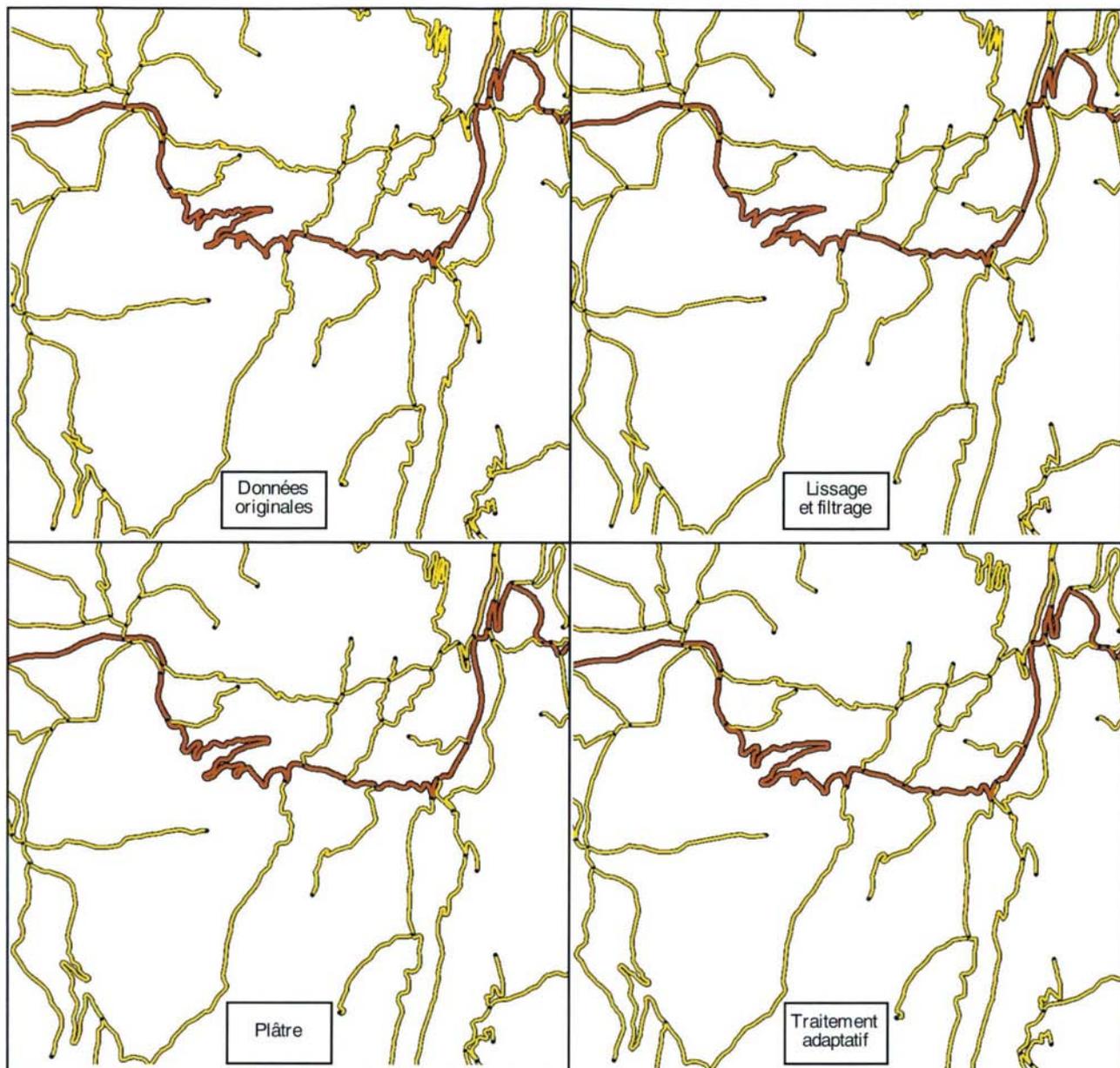


figure B.5.16

Qualification des résultats

Les résultats sont globalement satisfaisants au niveau de la qualité cartographique et justifient le bien-fondé de notre approche adaptative et à plusieurs niveaux d'analyse.

Les zones non empâtées à l'origine et qui subissent donc un simple lissage, sont de loin les plus nombreuses dans toute base de données, et particulièrement en zone de plaine. Aucun problème n'apparaît sur ces zones puisqu'elles sont traitées de manière simple; les petites inflexions sont éliminées et la forme globale est préservée; peu de déplacements sont introduits. Seuls quelques virages non empâtés mais isolés sont indûment éliminés.

Parmi les zones où des problèmes de lisibilité apparaissent à l'origine, une très grande partie sont des virages isolés, l'algorithme "ouverture maximale" y est donc appliqué. Le traitement de ces zones est dans 99% des cas efficace. Ces virages sont agrandis et donc bien lisibles, et vu leur isolement, leur agrandissement ne crée pas de conflits avec d'autres parties de la ligne.

Sur les autres zones, si les virages empâtés sont des virages en lacet bien alignés le traitement est efficace : les virages sont bien écartés les uns des autres et les sommets des virages sont bien ouverts. S'ils ne sont pas bien alignés le traitement est moins bon parfois. Dans certains cas aussi (qui ne se produisent que très rarement pour le passage de la BD CARTO au 1 : 250 000), il serait nécessaire de caricaturer la série de virages en éliminant un virage ce qui n'est pas fait dans le processus actuel mais est facilement intégrable.

Une dernière limitation de l'approche actuelle se situe au niveau des propagations des déplacements créés par les traitements locaux qui mériteraient d'être diminués ou accentués dans certains cas en fonction des géométries rencontrées.

Comparaison avec d'autres approches

Les SIG classiques ne fournissent que des outils de lissage et filtrage, et donc aucun outil de caricature. On voit en figure B.5.15 que ce type de traitement est inefficace sur toutes les zones un tant soit peu sinueuses. L'avantage de notre approche est d'utiliser les outils simples des SIG sur les zones où ce traitement est approprié et d'utiliser des traitements plus complexes et adaptés sur les autres zones.

L'algorithme Plâtre [FRITSCH 97] (basé sur le principe du lissage de la courbure) est beaucoup plus générique que les simples lissages et filtrages et effectue à la fois un lissage et une caricature des virages. Les résultats de notre approche et de celle de Plâtre sont très proches dans les zones non sinueuses et sur les virages isolés. Par contre, notre approche introduit une opération d'écartement d'une série de virage ce que ne fait pas Plâtre.

Les résultats sont donc globalement meilleurs sur les séries de virages en lacet. Par contre, dans les très rares zones de géométrie très complexes (virages serrés, proches et non alignés), aucun des deux traitements n'est vraiment satisfaisant, mais l'algorithme Plâtre crée un peu moins d'aberrations.

Axes de recherche

Pour remédier aux limites de cette méthode des travaux sont en cours au laboratoire COGIT dans différentes directions.

Amélioration des algorithmes

Certains algorithmes doivent encore être améliorés afin de pouvoir s'appliquer efficacement dans plus de cas; par exemple des travaux sur l'adaptation de l'accordéon sur les virages non alignés sont en cours au laboratoire COGIT et devraient résoudre de nombreux problèmes sur les séries de virages en lacet.

Par ailleurs la stratégie employée reposant sur beaucoup de découpages et recollages de zones, il serait nécessaire d'améliorer la gestion des propagations des déformations lors des recollages.

Caractérisation géométrique des lignes

La caractérisation qui guide au choix des algorithmes à appliquer doit être enrichie par une étude de la géométrie de la ligne et, en particulier, prendre en compte à la fois les caractéristiques des zones voisines dans la ligne d'une zone après découpage (afin de différencier les virages isolés de ceux au milieu une série par exemple) et les caractéristiques de sinuosités (afin d'ajuster le choix d'algorithmes à appliquer) [PLAZANET 96].

Mise en place du processus

Le processus mérite d'être enrichi afin de pouvoir affiner le résultat, intégrer de nouveaux algorithmes, et s'adapter aux différentes contraintes de la carte (les routes d'une carte routière ne se généralisent pas de la même manière que celles d'une carte d'occupation du sol, par exemple). En particulier, le réglage des paramètres doit se faire de manière plus adaptative.

Par ailleurs, afin d'intégrer la généralisation des réseaux dans un processus général de généralisation, il est nécessaire de tenir compte de l'environnement d'une ligne (les autres lignes mais aussi le reste de l'environnement). Dans un premier temps, nous pouvons considérer l'environnement comme influence extérieure à la généralisation et ne pas le traiter simultanément à la généralisation des routes.

Le processus décrit dans cet article a été déterminé empiriquement, cependant des travaux débutent au laboratoire COGIT pour étudier dans quelle mesure, les outils d'apprentissage en intelligence artificielle permettraient de l'enrichir et de le rendre plus souple vis-à-vis des contraintes de la carte.

Mesures de validation

Il est nécessaire de valider les opérations effectuées afin tout d'abord de détecter les résultats aberrants, ensuite d'affiner le résultat en choisissant le meilleur traitement entre plusieurs algorithmes potentiellement efficaces dans un même cas de figure (si on ne peut déterminer *a priori* quel algorithme doit être utilisé), et enfin de contrôler le respect des contraintes cartographiques évoquées ci-dessus.

Ce travail nécessite une formalisation des contraintes cartographiques comme celle effectuée par [WEIBEL 96] et la continuation des travaux du laboratoire COGIT sur les mesures de validation.

Références

- [BEARD 91] K. Beard : *Theory of the Cartographic Line Revisited. Implications for automated Generalization*, in *Cartographica*, Vol. 28, n° 4, Winter 91, p. 32-58, 1991.
- [NICKERSON 88] : BG. Nickerson : *Automated Cartographic Generalization for Linear Features*, in *Cartographica*, Vol 25, No 3, pp. 15-66, 1988.
- [PERKAL 66] J. Perkal] : *An Attempt at Objective Generalization*, Discussion, Paper No 10, Ann Arbor, MI. Trad. Jackowsky J. de Proba abietktywnej generalizacji Geodezja i Kartografia, 1958, Vol 7, pp. 130-142, 1996.
- [WEIBEL 96] R. Weibel : *A Typology of Constraints to Line Simplification*, SDH'96, in proceedings, Vol. 2, 1996.

Publications

- [FRITSCH 97] E. Fritsch : *Représentations de la géométrie et des contraintes cartographiques pour la généralisation du linéaire routier*, thèse de l'université de Marne-La-Vallée, laboratoire COGIT, IGN SR 970008/S-THE, 1997
- [LECORDIX, PLAZANET 96] F. Lecordix & C. Plazanet : *Plate-forme de généralisation PlaGe et application à la caricature*, in *Bulletin d'Information de l'IGN n° 65*, Activité Recherche 1995, pp. 50-59, laboratoire COGIT, 1996.
- [LECORDIX et al 97] F. Lecordix, C. Plazanet & JPh. Lagrange : *A Platform for Research in Generalization. Application to caricature*, in *Geoinformatica 1 : 2* 1997, pp161-181, laboratoire COGIT, IGN-SR 970022/S-ART, 1997.
- [RUAS 98] A. Ruas : *OEEPE Working Group on Generalisation*, in *News letter 98*, article à paraître, laboratoire COGIT, IGN-SR 980004/S-ART, 1998.
- [PLAZANET 96] C. Plazanet : *Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique (application aux routes)*, rapport de thèse, Univ. Marne-la-Vallée / laboratoire COGIT, IGN-SR 960017/S-THE, 1996.

B.6 Appariement géométrique de surfaces

François Vauglin

Résumé

La production de données géographiques suit un processus complexe non déterministe, dont plusieurs occurrences fourniront autant de jeux de données différents. Les Systèmes d'Information Géographique permettent la manipulation de données très diverses. Lorsqu'elles proviennent de saisies différentes, toutes ces données doivent être appariées avant de pouvoir être utilisées.

Cet article présente un algorithme d'appariement géométrique de données géographiques surfaciques. Sa particularité est de traiter les surfaces géographiques en tant qu'objets spécifiques, alors que les approches existantes les ont souvent réduites à la géométrie linéaire de leur contour.

L'algorithme proposé, qui repose sur des mesures mathématiques spécifiques aux objets surfaciques, procède par filtrages successifs : une liste de surfaces candidates à l'appariement est construite très largement par défaut, et les surfaces qui ne sont pas similaires sont rejetées de cette liste par des filtres définis sur les mesures mathématiques surfaciques.

Le présent article conclut en présentant les tests qui ont été conduits sur divers jeux de données, parmi lesquels la couche d'occupation du sol de la BD CARTO et de Corine Land-Cover, le bâti de la BD TOPO et le Cadastre, ou encore l'occupation du sol de la BD TOPO.

Contexte

Objectif

La géométrie des objets géographiques est modélisée dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) par des points, des polygones, et des polygones. Les polygones et les polygones sont souvent de simples listes de points, ce qui montre la place prépondérante du point dans les SIG. Or certains objets géographiques sont de nature linéaire ou surfacique, comme les routes, les maisons, les parcelles, les lacs....

Ces objets sont modélisés dans les SIG par des listes de points, mais, dans un but d'efficacité, leur caractère bi- ou tri-dimensionnel doit être pris en compte. Il est donc nécessaire de développer des outils spécifiques pour manipuler la géométrie linéaire ou surfacique de ces objets. Cette réflexion est issue du travail de thèse sur la modélisation de la précision géométrique linéaire [VAUGLIN 97].

L'information géographique est souvent structurée en couches thématiques. Dans de nombreuses applications, il est utile de superposer plusieurs couches thématiques qui peuvent être issues de diverses origines ou représenter différentes classes d'objets. L'opération de superposition se décompose en deux étapes : l'appariement d'objets en correspondance entre le jeu de données et le terrain nominal, et le regroupement des objets qui sont appariés pour qu'ils ne fassent plus qu'un en partageant même sémantique et même géométrie.

L'algorithme d'appariement présenté ici se restreint à l'utilisation de l'information géométrique des objets surfaciques, pour lesquels il n'existe quasiment pas d'outil dédié. Il a été mis au point par [BEL HADJ ALI 97] lors d'un stage s'inscrivant dans le cadre des travaux de recherche sur la qualité des données.

Données

L'appariement de données ne peut être envisagé que lorsqu'au moins deux jeux de données sont disponibles. La mise au point et les tests de l'algorithme d'appariement surfacique présenté ici ont été conduits sur trois types de données :

- Bâti du Cadastre français et de la BD TOPO. La zone de tests correspondante couvre une banlieue pavillonnaire de 5 km² à l'ouest de l'agglomération lyonnaise.
- Occupation du sol de la BD TOPO. Plusieurs saisies de la même région ont été faites avec les mêmes photographies aériennes et les mêmes spécifications. Ces saisies sont issues d'une étude de sous-traitance dans laquelle la seule variable était le cabinet de reconstituteurs. Le jeu de données utilisé couvre 34,5 km² de la région de Bédarieux dans le sud de la France.
- Occupation du sol de la BD CARTO et de Corine Land-Cover. Deux jeux-tests ont été utilisés : la partie septentrionale du département de l'Alsace, et la partie médiane de la Franche-Comté.

Le choix de ces jeux de données est lié à leur grande diversité d'échelles et à la variété des classes d'objets : le bâti du Cadastre est d'une nature géométrique très différente des parcelles d'occupation des sols de Corine. Outre par leurs formes, c'est aussi par le flou des spécifications qu'ils diffèrent. De plus, une couche de bâti est un ensemble de polygones disjoints, alors que l'occupation du sol recouvre l'espace.

Cette importante diversité a permis de mettre au point un algorithme d'autant plus robuste et dont la validité est plus large.

Implémentation

L'algorithme présenté a été mis au point et implémenté sous ArcInfo. Toutes les fonctions qui n'existaient pas dans ce SIG ont été programmées dans le langage propre, AML.

Actions menées

Ce papier livre le squelette de l'algorithme. Sa présentation détaillée complète et celle des tests réalisés pour sa mise en œuvre sont présentées dans [BEL HADJ ALI 97].

Construction d'une table d'appariement

L'appariement de données géographiques peut être réalisé par la construction d'une "table d'appariement" : dans le cas étudié ici (appariement de surfaces), chaque polygone est muni d'un identifiant unique (id°). Pour chaque polygone d'une couche donnée, il s'agit de chercher la liste des polygones de l'autre couche qui peuvent lui être appariés.

D'un point de vue informatique, cette opération revient à chercher à faire correspondre à un identifiant donné id°_i , une liste d'identifiants $\{id^{\circ}_j\}$ des polygones de l'autre couche. La représentation de cette mise en correspondance se fera par la construction d'une table organisée comme sur le tableau B.6.1.

tableau B.6.1 : structure de la table d'appariement

Couche 1	Couche 2
...	...
id°_i	id°_m
id°_i	id°_n
...	...
id°_{i+1}	id°_q
...	...

Le principe retenu consiste à proposer par défaut une table d'appariement trop large, qui contient tous les polygones qui sont susceptibles d'être appariés.

Ceux-ci seront tous les couples de polygones qui ont une intersection non vide. Des indicateurs surfaciques, calculés sur tous ces candidats à l'appariement, permettent alors de ne retenir que les identifiants des polygones effectivement appariés. De la sorte, les indicateurs surfaciques définissent des filtres qui sont appliqués sur la table d'appariement jusqu'à obtention des seuls polygones appariés.

La table d'appariement de départ, qui contient tous les couples de polygones présentant une intersection non vide, subit un premier filtre élémentaire : sont supprimés les couples de polygones dont l'aire commune est plus petite que la plus petite des aires de tous les polygones de l'une ou l'autre couche. Ce pré-filtrage permet d'éliminer l'essentiel des polygones dits "parasites".

Filtrage de la table d'appariement

À l'évidence, la table construite jusqu'ici met en correspondance beaucoup de polygones qui ne sont pas appariables. Un premier filtre est alors défini à partir de l'indicateur surfacique de la formule suivante, dénommé "Paramètre d'Inclusion" et noté P_i .

Pour deux polygones P_1 et P_2 et en notant A l'aire, P_i est défini ainsi :

$$P_i(P_1, P_2) = \frac{A(P_1 \cap P_2)}{\min(A(P_1), A(P_2))}$$

Lorsque les polygones sont disjoints, le paramètre d'inclusion est nul. Lorsqu'ils sont égaux ou que l'un est inclus dans l'autre, il vaut 1. Dans toutes les situations intermédiaires, il varie entre 0 et 1. Les valeurs les plus faibles correspondent au plus faible recouvrement des polygones.

Expérimentalement, les tests conduits ont montré un comportement global constant : pour un jeu de données quelconques, l'histogramme du paramètre d'inclusion présente un minimum aux alentours de la valeur 0,45.

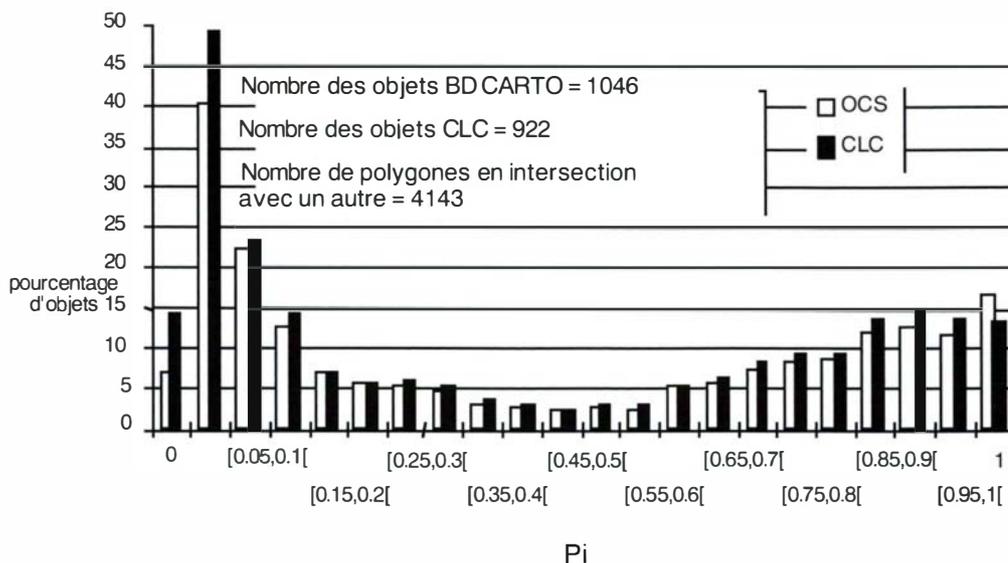


figure B.6.2 : histogramme du paramètre d'inclusion entre les polygones de la couche d'occupation du sol de la BD CARTO et de Corine Land-Cover (centre de la Franche-Comté).

Ce comportement, manifeste sur la figure B.6.2 et constant sur tous les jeux tests de cette étude, pourtant fort disparates (Cadaastre, BD TOPO, BD CARTO, Corine Land-Cover), correspond en première approximation à une valeur limite du paramètre d'inclusion : les couples de polygones dont le paramètre d'inclusion est inférieur à 0,45 sont trop différents pour être géographiquement appariables, et ceux dont le paramètre d'inclusion est supérieur à 0,45 sont appariables.

Dans ces conditions, le critère $P_i = 0,45$ permet de définir le seuil d'un filtre qui doit être appliqué à la table d'appariement pour supprimer les couples de polygones pour lesquels le paramètre d'inclusion est inférieur au seuil 0,45; autrement dit les polygones qui ne sont pas appariables.

En pratique, il semble que la valeur du seuil peut varier entre 0,45 et 0,5. Il n'est pas raisonnable de prendre un seuil supérieur à 0,5 car la configuration évacuerait des polygones qui se recouvrent à plus de moitié.

L'objectif étant de faire des filtres de plus en plus sélectifs, on ne préconisera toutefois pas l'usage d'un seuil inférieur à 0,45 qui conserverait trop de polygones non appariables sans inclure plus de polygones appariables.

Sur les jeux tests utilisés, la valeur 0,45 est optimale et permet d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

Remarquons que l'objectif de faire des filtres de sélectivité croissante est atteint : ce filtre est à l'évidence plus sélectif que le précédent, qui constituait à conserver tous les couples de polygones pour lesquels l'aire d'intersection est supérieure à la plus petite aire de tous les polygones.

La règle de filtrage par le paramètre d'inclusion a toutefois ses limites. La figure B.6.3 présente une situation où un polygone du cadastre est largement recouvert par un polygone de la BD TOPO sans que la décision d'apparier puisse être validée. Dans ce cas, la valeur de P_i peut être largement supérieure au seuil de 0,45 (pour la figure B.6.3) :

$$P_i(1, A) = 0,7 \text{ et } P_i(1, B) = 0,05 \text{ environ}$$

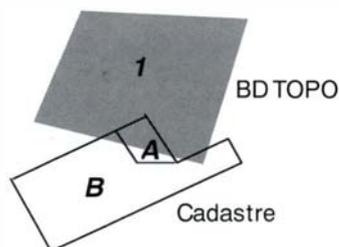


figure B.6.3 : cas où les polygones 1 et A ou 1 et B ne doivent pas être appariés alors que $P_i(1, A) > 0,45$

Si les polygones A et B du Cadastre avaient été disposés comme sur la figure B.6.4, et avec la même valeur de paramètre d'inclusion entre 1 et A, il aurait fallu conserver globalement le couple (A, B) en correspondance avec le polygone 1 dans la table d'appariement.

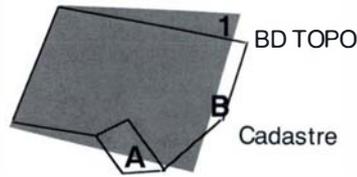


figure B.6.4 : les polygones 1 et A sont en configuration similaire à la figure B.6.3, mais doivent ici être appariés

Les polygones disposés de façon similaire aux polygones 1 et A de la figure B.6.3 doivent donc être supprimés de la table d'appariement par un nouveau filtre, alors que ceux qui sont disposés comme les polygones 1 et (A, B) de la figure B.6.4 doivent être conservés.

Mise en place finale de l'appariement

Pour répondre aux problèmes résiduels des filtrages précédents de la table d'appariement, le dernier filtre mis en place dans cet algorithme repose sur la distance surfacique déjà décrite lors de travaux sur la qualité du linéaire [VAUGLIN 97].

La distance surfacique entre deux polygones non dégénérés P_1 et P_2 , la distance surfacique D_s est donnée par la formule suivante (en notant A l'aire) :

$$D_s(P_1, P_2) = 1 - \frac{A(P_1 \cap P_2)}{A(P_1 \cup P_2)}$$

D_s est une distance au sens mathématique. En particulier, sa valeur est nulle lorsque P_1 et P_2 sont égaux et vaut 1 lorsqu'ils sont disjoints. Sa définition reste valide même si P_1 ou P_2 est un ensemble de polygones. Cette propriété permet de traiter les cas similaires à celui présenté en figure B.6.5 en détectant des appariements m:n. Pour ce faire, il suffit de parcourir séquentiellement la table d'appariement issue des filtrages précédents, et de construire des groupes de polygones en retenant l'ensemble de ceux qui sont appariés avec un même polygone de l'autre couche.

Les éventuels conflits, qui surgissent lorsque plusieurs polygones participent à des groupes différents, sont réglés en conservant les groupes qui minimisent la distance surfacique. Avec les notations déjà adoptées, on obtient de la sorte un groupe de polygones $\{id^o\}$ de la première couche appariés avec un ou plusieurs polygones $\{id^o\}$ de la deuxième couche. La distance surfacique sera alors évaluée entre $\{id^o\}$ et $\{id^o\}$. Le dernier filtre peut alors être lancé.

Ce filtre est défini de manière similaire au filtre fondé sur le paramètre d'inclusion : l'histogramme des distances surfaciques montre une certaine stabilité dans le comportement de cette distance, avec un minimum au-delà de la valeur 0,6 (voir figure B.6.7). Un seuil est ainsi défini et les couples de polygones ne respectant pas ce seuil sont supprimés de la table d'appariement.

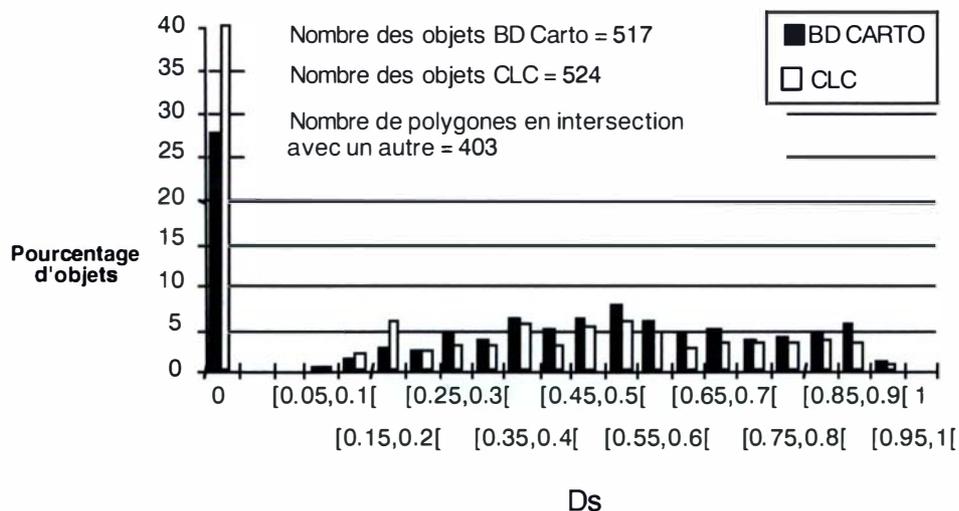


figure B.6.7 : histogramme de la distance surfacique entre les polygones de la couche d'occupation du sol de la BD CARTO et de Corine Land-Cover (centre de la Franche-Comté)

Si un minimum relatif de distance surfacique apparaît toujours au-delà de 0,6, le comportement des histogrammes de D_s ne présente pas, sur les différents jeux de données utilisés dans cette étude, une stabilité aussi forte que pour les histogrammes de P_i . De plus, il semble opportun de laisser à l'utilisateur une certaine maîtrise sur l'appariement réalisé. Ainsi, les tests mis en place ont conduit à adopter visuellement une valeur du seuil S_0 de filtrage sur la distance surfacique variant entre 0,6 et 0,7 selon les cas : les valeurs exactes sont présentées avec les résultats dans le paragraphe suivant (voir chapitre suivant : Résultats). Notons que les polygones sont conservés lorsque la distance surfacique est inférieure au seuil, rejetés lorsqu'elle est supérieure.

La validité de ce filtre et de la latitude laissée à l'utilisateur provient de la considération des motifs qui ont conduit à sa mise en place : constitution d'ensembles de polygones pour un appariement m:n et décision sur les situations analogues aux figures B.6.4 et B.6.5 remise entre les mains de l'utilisateur. En effet, le choix du seuil S_D permet de fixer la taille minimale pour que des objets qui partagent localement une forme commune, mais qui sont de tailles très différentes, soient appariés ou non (figure B.6.8). Le seuil S_D , choisi globalement par l'utilisateur pour l'appariement d'un lot avec un autre lot, est ainsi le paramètre unique qui permet de maîtriser le type d'appariement souhaité. Une grande valeur de seuil aboutira à un appariement de toutes les formes qui sont proches, indépendamment de leurs tailles globales, alors qu'une faible valeur de seuil ne mettra en correspondance que les formes qui sont proches et de même taille.

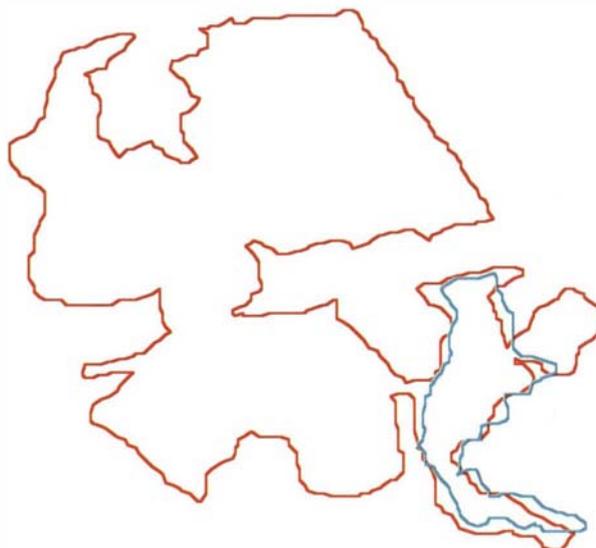


figure B.6.8

deux polygones de la couche d'occupation du sol de la BD CARTO et de Corine Land-Cover (centre de la Franche-Comté)

Selon les utilisations, le polygone vert peut être considéré comme apparié ou non au polygone rouge. Ce choix, maîtrisé par le seuil S_D , est fonction des tailles relatives des deux polygones : pour de fortes valeurs de S_D , un petit polygone constitutif d'une partie d'un plus grand pourra lui être apparié, alors que tel ne sera pas le cas pour de plus faibles valeurs de S_D .

Enfin, la constitution pratique des ensembles de polygones pour un appariement m:n découle des propriétés de la distance surfacique D_S . La figure B.6.9 présente ce type d'appariement.

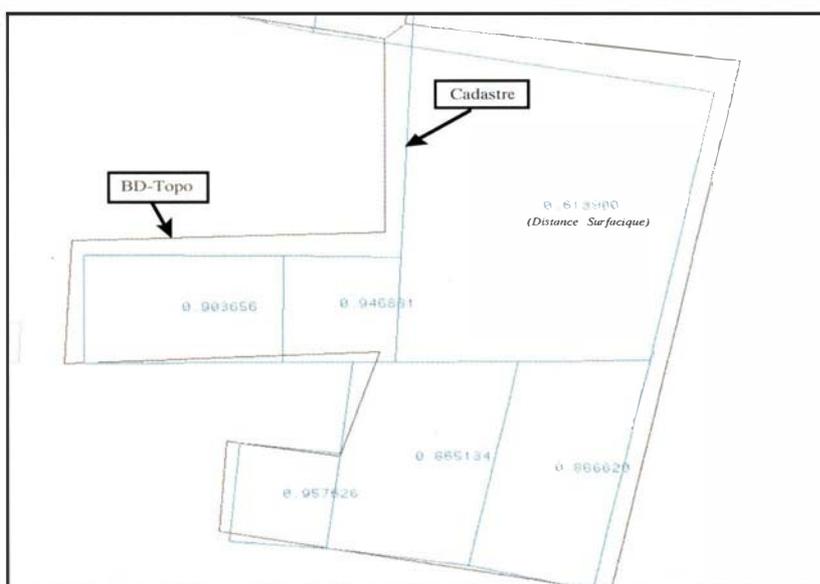


figure B.6.9 : appariement de bâtiments du Cadastre et de la BD TOPO

En figure B.6.9, chaque distance surfacique entre les bâtiments du Cadastre (bleu) et le bâtiment de la BD TOPO (rouge) est indiquée. L'importance du choix du seuil S_D est particulièrement mis en valeur sur cette figure : les plus grands polygones du Cadastre ont une distance au polygone BD TOPO inférieure à celles des plus petits. Lors du parcours séquentiel de la table d'appariement (décrit au chapitre "mise en place..."), les six bâtiments du Cadastre sont réunis dans un ensemble pour être apparié au bâtiment BD TOPO. De la sorte, la distance surfacique est réduite à une valeur très faible (inférieure à 0,1) ce qui permet à l'algorithme de réaliser l'appariement.

Résultats

L'ensemble des résultats obtenus sont présentés ici de manière synthétique. On pourra se reporter à [BEL HADJ ALI 97] et à [VAUGLIN et al 98].

Cadastre et BD TOPO (bâti)

Le premier test a été conduit sur la couche de bâtis du Cadastre et de la BD TOPO. L'appariement optimal de ces données (contrôle visuel) a été obtenu pour un seuil sur la distance surfacique S_D de 0,6. Cette valeur conduit aux résultats présentés au tableau B.6.10.

tableau B.6.10 : résultat de l'appariement Cadastre-BD TOPO sur le bâti

	Nombre total d'objets	Nombre d'objets appariés	Nombre d'objets vérifiant $S_D > 0,6$	Nombre d'objets disjoints
Cadastre	3083	2295	22	766
BD TOPO	1173	1097	12	64

Dans la troisième colonne ("Nombre d'objets vérifiant $S_D > 0,6$ "), ne sont comptés que les objets qui étaient présents dans la table d'appariement mais qui ne respectaient pas le dernier critère de filtrage portant sur la distance surfacique.

Dans ce test, les objets correctement appariés (deuxième colonne) représentent 99% des objets du cadastre et 98,92% des objets de la BD TOPO. Un extrait du résultat est présenté en figure B.6.11.



figure B.6.11 : résultat de l'appariement du bâti Cadastre - BD TOPO (extrait)

Sur la figure B.6.11, les objets du Cadastre sont pleins, alors que ceux de la BD TOPO sont représentés par leur contour. Les objets appariés sont en vert pour le Cadastre et en bleu foncé pour la BD TOPO, les objets non appariés sont en rouge pour le Cadastre et en noir pour la BD TOPO, et les objets présents dans la table d'appariement mais rejetés par le dernier filtre ($S_D > 0,6$, présentés dans la troisième colonne du tableau B.6.10) sont en hachures rouges pour le Cadastre et en contour rouge pour la BD TOPO.

Deux restitutions de la BD TOPO (occupation du sol)

Le deuxième test, opéré sur la restitution de la BD TOPO réalisée par des cabinets différents de restituteurs avec les mêmes données, a conduit aux résultats présentés au tableau B.6.12. L'appariement optimal a été obtenu ici avec un seuil S_D de 0,65.

tableau B.6.12 : résultat de l'appariement de deux versions de la BD TOPO sur l'occupation du sol

	Nombre total d'objets	Nombre d'objets appariés	Nombre d'objets vérifiant $S_D > 0,65$	Nombre d'objets disjoints
Restituteur n°1	412	267	17	128
Restituteur n°2	479	317	20	142

Les mêmes notations sont utilisées que pour le tableau B.6.10. Les objets correctement appariés, présentés en deuxième colonne du tableau B.6.12, représentent 94% du premier jeu de données et 94% du deuxième jeu.

BD CARTO et Corine Land-Cover (occupation du sol)

Le dernier test, conduit sur l'occupation des sols de Corine Land-Cover comparée à la BD CARTO a pu être optimisé avec un seuil sur la distance surfacique de 0,7, ce qui a conduit aux résultats présentés dans le tableau B.6.13.

tableau B.6.13 : résultat de l'appariement BD CARTO-Corine Land-Cover sur l'occupation des sols

	Nombre total d'objets	Nombre d'objets appariés	Nombre d'objets vérifiant $S_D > 0,7$	Nombre d'objets disjoints
BD CARTO	517	255	119	144
Corine L. C.	525	223	92	210

Les mêmes notations sont utilisées que pour le tableau B.6.10. Les objets correctement appariés, présentés en deuxième colonne du tableau B.6.13, représentent 68% du nombre d'objets de la BD CARTO et 71% de ceux de Corine Land-Cover. Il est à noter que les deux jeux de données présentaient de très grandes disparités, jusque dans la définition des classes d'objets.

Suite

L'algorithme présenté ici pourrait être qualifié : il s'agit d'un appariement "surfacique". En effet, il se borne à mettre en jeu des techniques utilisant les surfaces et les aires. La notion de contour n'intervient pas et les objets surfaciques sont bien manipulés comme tels. Une conséquence immédiate de ce parti pris est d'évacuer le problème classique posé par les trous dans les polygones. Ici, avec ou sans trous, l'algorithme fonctionne de façon rigoureusement identique.

Testé sur des jeux de données fort variés, il a montré une certaine robustesse. Le plus significatif est qu'il semble atteindre un résultat très similaire à ce qu'un opérateur manuel obtiendrait en appariant les mêmes données sans information supplémentaire. Les taux d'appariements corrects sont très élevés dans le cas du Cadastre avec la BD TOPO, qui était évidemment le cas le plus facile.

Les résultats obtenus sur les couches d'occupation des sols présentent des taux d'appariement corrects moins élevés, ce qui ne saurait masquer leur utilité : les données d'occupation des sols sont toujours fortement dépendantes du restituteur, et l'interprétation des spécifications contient une grande part de flou. Dans le cas de Corine Land-Cover et de la BD CARTO, l'appariement a même du être précédé d'une redéfinition des classes d'objets car elle ne coïncidaient pas.

Pour l'ensemble des tests présentés ici, le seuil de filtrage sur le paramètre de d'inclusion P_i était de 0,45. L'opportunité de prendre d'autres valeurs pourrait être étudié, même si elle ne nous a pas semblé évidente au premier abord. L'adaptation de l'algorithme à d'autres types de jeux de données pourrait nécessiter d'introduire un second degré de liberté en laissant à l'utilisateur le choix de la valeur du paramètre P_i .

Par ailleurs, l'appariement réalisé est purement géométrique. Il devrait donc être possible de l'améliorer encore en s'appuyant sur l'information sémantique et topologique.

Finalement, cette expérience montre que les données géographiques peuvent être manipulées en respectant leur dimension topologique : les points, les lignes, et les surfaces gagnent à être manipulés par des algorithmes particuliers plutôt que de toujours considérer les lignes comme des ensembles de points et les surfaces comme des ensembles de lignes.

Publications

[BEL HADJ ALI 97 A. Bel Hadj Ali : *Appariement géométrique des objets géographiques et étude des indicateurs de qualité*, stage de DEA SIG de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 970010/S-STA, 18 septembre 1997.

[ZEROUAL ,SAIDI 97] I. Zeroual & Saidi : *Approche méthodologique pour l'évaluation de la qualité dans une base de données géographiques numérique*, Rapport de stage, fait à IGN/COGIT, Centre National des Techniques Spatiales (CNTS), laboratoire COGIT, IGN-SR 970018/S-STA, janvier 1997.

[VAUGLIN 97a] F. Vauglin : *Modèles statistiques des imprécisions géométriques des objets géographiques linéaires*, thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 970021/S-THE, soutenue le 21 avril 1997.

[VAUGLIN 97b] F. Vauglin : *Statistical Representation of Relative Positional Uncertainty for Geographical Linear Features*. Data Quality in Geographic Information - From Error to Uncertainty, Michael Goodchild & Robert Jeansoulin (Eds), livre publié par Hermès, pp. 87-96, Paris, laboratoire COGIT, IGN-SR 970044/S-ART, 1997.

[HARVEY, VAUGLIN 97] F. Harvey & F. Vauglin : *No fuzzy creep! A clustering algorithm for controlling arbitrary node movement.*, Auto-Carto 13, technical paper, ACSM ASPRS, Annual convention, vol. 5, pp. 317-326. Seattle (WA USA), laboratoire COGIT, IGN-SR 970029/S-COM, 7-10 avril 1997.

B.7 L'ITRF96 : nouvelle génération de réalisation du Système International de Référence Terrestre

Zuheir Altamimi, Claude Boucher et Patrick Sillard

Résumé

Le Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG) a, au niveau international, la responsabilité de l'établissement, la maintenance et la diffusion du Repère International de Référence Terrestre (ITRF : International Terrestrial Reference Frame).

L'ITRF est la réalisation (ensemble de stations avec leurs positions) du Système International de Référence Terrestre (ITRS : International Terrestrial Reference System). Cette activité se place dans le cadre du Bureau Central du Service International de la Rotation Terrestre (IERS) dont les activités sur l'ITRF sont confiées au laboratoire LAREG depuis 1988. L'ITRS est réalisé quasi annuellement, par combinaison de jeux de coordonnées et de vitesses de stations provenant des centres d'analyse des techniques de géodésie spatiale; VLBI, LLR, GPS, SLR et DORIS.

Ces réalisations, appelées ITRF_{aa}, sont : ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94 et ITRF96. Notons que l'ITRF_{aa} est réalisé l'année aa+1, utilisant les données des observations cumulées depuis les années 70 jusqu'à l'année aa.

L'ITRF96 représente une nouvelle génération de réalisation de l'ITRS, établi par le laboratoire LAREG en 1997. La stratégie adoptée dans cette réalisation repose sur deux composantes essentielles : d'une part, une combinaison simultanée de positions et vitesses de stations faisant intervenir les matrices de variances/covariances complètes et, d'autre part, un processus de pondération rigoureux, basé sur l'analyse et l'estimation des composantes de la variance en utilisant la méthode de Helmert.

Cette approche a conduit à des bons résultats faisant apparaître une nette amélioration de l'ITRF96 par rapport aux réalisations précédentes.

Méthodologie

L'idée de base est la combinaison rigoureuse de données de positions et vitesses des stations issues de différentes techniques de géodésie spatiale, dans le but d'établir un repère de référence terrestre unifiant les qualités de toutes ces techniques. La nouvelle stratégie adoptée dans la réalisation de l'ITRS concerne l'amélioration, à la fois du modèle de combinaison et le modèle stochastique d'estimation.

Modèle physique de combinaison

On suppose que pour chaque solution individuelle s et pour chaque point i , nous avons des coordonnées X_s^i à une époque t_s , et des vitesses \dot{X}_s^i , exprimées dans un système de référence k . La combinaison consiste en l'estimation des :

- positions X_{itrf}^i à une époque t_0 et des vitesses \dot{X}_{itrf}^i
- paramètres de transformation T_k et leur dérivées par rapport au temps \dot{T}_k , de l'ITRF vers le système individuel k .

le modèle physique de combinaison est donnée par l'équation (1) suivante :

$$\begin{cases} X_s^i = X_{itrf}^i + (t_s - t_0) \dot{X}_{itrf}^i + T_k + D_k X_{itrf}^i + R_k X_{itrf}^i \\ \quad + (t_s - t_k) (\dot{T}_k + \dot{D}_k X_{itrf}^i + \dot{R}_k X_{itrf}^i) \\ \dot{X}_s^i = \dot{X}_{itrf}^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k X_{itrf}^i + \dot{R}_k X_{itrf}^i \end{cases}$$

où pour chaque système individuel k , D_k est le facteur d'échelle, le vecteur de translation T_k et la matrice de rotation R_k sont respectivement définis par (selon les conventions IERS) :

$$T_k = \begin{pmatrix} T1_k \\ T2_k \\ T3_k \end{pmatrix} \text{ et } R_k = \begin{pmatrix} 0 & -R3_k & R2_k \\ R3_k & 0 & -R1_k \\ -R2_k & R1_k & 0 \end{pmatrix}$$

Les paramètres pointés désignent leur dérivées par rapport au temps. $T1_k, T2_k, T3_k$ sont les trois composantes de l'origine, $R1_k, R2_k, R3_k$ sont les trois rotations, respectivement selon les 3 axes X, Y, Z.

Modèle stochastique

La combinaison de données hétérogènes a été dès le début, un des principaux éléments d'analyse de l'ITRF. Ce problème est, par essence, statistique. Jusqu'à l'ITRF96, les données ont été homogénéisées par une méthode de pondération empirique. Pour l'ITRF96, une estimation théorique de la pondération a été construite et utilisée dans une approche stochastique.

Les solutions individuelles de positions et vitesses des stations sont considérées comme statistiquement indépendantes. De plus, leur matrices de variance sont supposées connues à un facteur multiplicatif près (facteur de variance). Par conséquent, pour la l ème solution, on peut postuler que:

$$\begin{cases} E(Y_l) = \dot{Y} \\ cov(Y_k, Y_l) = \delta_l^k \sigma_l^2 \Sigma_l \end{cases}$$

où Y_l est le vecteur des observations (coordonnées et vitesses) dans la l ème solution et δ_l^k est le symbole de

Kroneckel ($1 < l < p$). $E(Y)$ est l'espérance de la variable aléatoire Y ; \dot{Y} est la valeur exacte de Y et $cov(X, Y)$ est la matrice de covariance de X et Y .

Le facteur de variance σ_l^2 est estimé itérativement par la méthode d'estimation de la variance de Helmert [Grafarend, 1984; Rao and Kleffe, 1973; Rao, 1988]. L'estimateur $\hat{\mathbf{s}}$ du vecteur $\mathbf{s} = (\sigma_1^2, \dots, \sigma_p^2)^T$ est donné par :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{s}} = \begin{pmatrix} \hat{\sigma}_1^2 \\ \vdots \\ \hat{\sigma}_p^2 \end{pmatrix} = H^{-1} \cdot \mathbf{q} \\ H_{l,k} = \delta_l^k [n_l - 2tr(vN_l)] + tr(vN_l v N_k) \\ \mathbf{q}_i = V_l^T \Sigma_l^{-1} \hat{V}_l \end{cases}$$

où tr est la fonction trace et v est l'inverse de la matrice normale de l'ajustement global. N_l est la matrice normale de la l ème solution et pour laquelle, n_l est le nombre total des observations; V_l est le vecteur des résidus de la combinaison en positions et vitesses. $\hat{\mathbf{s}}$ est un estimateur non biaisé de \mathbf{s} . L'idée de base dans la construction d'un tel estimateur est de minimiser, au sens du théorème de Gauss-Markov, la variance de l'estimateur des moindres carrés (v).

Les données utilisées

Les données utilisées dans l'ajustement de l'ITRF96 sont d'une part, des solutions de positions et vitesses de stations issues des techniques de géodésie spatiale et, d'autre part, des rattachements locaux reliant les stations en colocation. Les techniques spatiales concernées par cette réalisation sont : l'interférométrie à très long base (VLBI), la télémétrie Laser sur satellite, le Global Positioning System (GPS) et DORIS.

Les données de positions et vitesses de stations sont fournies par les centres d'analyse dans le format SINEX (format d'échange de données de géodésie spatiale) utilisé au niveau international, à la conception duquel le laboratoire LAREG a pris une part importante.

Données fournies par les centres d'analyse IERS

Les solutions de positions et vitesses de stations ainsi que leur matrices de variance complète sont celles soumises au Bureau Central de l'IERS en 1997 ainsi que quelques autres solutions plus anciennes. Le tableau B.7.1 résume les solutions introduites dans l'ajustement de l'ITRF96.

Les données de rattachements entre les stations en colocation

Ces données représentent un élément central de première importance dans les combinaisons de solutions de différentes techniques de manière générale, et dans les calculs ITRF en particulier.

En effet, les rattachements entre les stations en colocation sont le lien indispensable entre les solutions individuelles et représentent le socle de l'estimation des paramètres de transformations entre les systèmes de référence sous-jacents. Il est bien évident que leur qualité influe sur celle de l'ITRF.

Afin d'améliorer l'utilisation de leur variances dans le calcul de l'ITRF96, les rattachements ont été compensés, en les considérant comme relations d'observation reliant les stations en colocation entre elles.

Ils ont ensuite été convertis en positions de points de chaque site en colocation, ainsi que des corrélations, et ceci dans le format SINEX.

Un fichier SINEX par site en colocation a donc été généré et les fichiers SINEX ainsi obtenus ont enfin été introduits dans le calcul de l'ITRF96, au même titre que les solutions de géodésie spatiale.

Analyse des données et calcul de l'ITRF96

En prélude au calcul d'un ITRF donné, il est important de procéder à une analyse rigoureuse des solutions individuelles afin d'étudier leur cohérence et qualité, les unes par rapport aux autres. Ainsi, en vue du calcul de l'ITRF96, des analyses spécifiques ont été opérées, comprenant :

- une comparaison de chaque solution individuelle à l'ITRF94 dans le but d'estimer d'une part les paramètres de transformation entre les deux systèmes sous-jacents et, d'autre part, le niveau d'accord avec l'ITRF94,
- une combinaison au sein de chaque technique, permettant d'évaluer les qualités relatives des solutions individuelles, indépendamment des rattachements locaux.

De plus, ces analyses conduisent à une première estimation des facteurs de variance, nécessaires à l'homogénéisation des solutions individuelles, en termes de pondération, avant la combinaison finale de l'ITRF96.

tableau B.7.1 : les solutions retenues pour l'établissement de l'ITRF96 et RMS

Solution	Centre d'analyse	Époque de référence	Période des observations	Nombre de points	RMS positions (mm)	RMS vitesses (mm/an)
<u>VLBI</u>						
SSC(GSFC) 97 R 01	Goddard Space Flight Center (USA)	93:001	1979-1997	120	5,8	1,9
SSC(GIUB) 97 R 01	Geodetic Institute of the Univ. of Bonn (Allemagne)	93:001	1984-1996	43	13,6	0,5
SSC(NOAA) 95 R 01	National Oceanic and Atmospheric Adm. (USA)	93:001	1979-1994	111	14,7	1,9
SSC(JPL) 97 R 01	Jet Propulsion Laboratory (USA)	93:001	1991-1996	8	20,7	
<u>SLR</u>						
SSC(CSR) 96 L 01	Center for Space Research, University of Texas (USA)	93:001	1976-1996	89	11,1	3,8
SSC(GSFC) 97 L 01	Goddard Space Flight Center (USA)	86:182	1980-1996	38	10,9	1,7
<u>GPS</u>						
SSC(EMR) 97 P 01	Energy, Mines and Resources (Canada)	96:001	1995-1997	36	10,0	3,5
SSC(GFZ) 97 P 02	GeoForschungsZentrum, Potsdam (Allemagne)	94:365	1993-1996	66	16,8	3,3
SSC(CODE) 97 P 02	Astronomical Inst., University of Berne (Suisse)	95:076	1993-1997	100	7,1	1,9
SSC(EUR) 97 P 04	Astronomical Inst., University of Berne, Suisse	96:090	1995-1996	39	2,4	0,3
SSC(EUR) 97 P 03	Astronomical Inst., University of Berne (Suisse)	96:339	1996-1997	58	2,9	0,3
SSC(MIT) 97 P 01	Massachusetts Institute of Technology (USA)	97:151	1994-1997	132	8,5	9,2
SSC(NCL) 97 P 01	University of Newcastle upon Tyne (Grande Bretagne)	96:001	1995-1997	114	5,4	6,3
SSC(JPL) 97 P 02	Jet Propulsion Laboratory (USA)	96:001	1991-1996	113	9,4	3,8
<u>DORIS</u>						
SSC(GRGS) 97 D 01	Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (France)	93:001	1993-1996	48	26,9	8,0
SSC(CSR) 96 D 01	Center for Space Research, University of Texas (USA)	93:001	1993-1996	54	26,1	10,6
SSC(IGN) 97 D 04	Institut Géographique National ENSG/LAREG (France)	95:100	1990-1997	62	28,3	12,8

La combinaison globale de l'ITRF96 a été réalisée en incluant :

- les 17 solutions de géodésie spatiale fournies, en format SINEX, par les centres d'analyse IERS, voir tableau B.7.1,
- 70 fichiers SINEX contenant les positions ainsi que des corrélations, calculées à partir des rattachements locaux entre les stations en colocation.

Les facteurs de variance des matrices individuelles ont été estimées itérativement dans le processus de l'ajustement de cette combinaison.

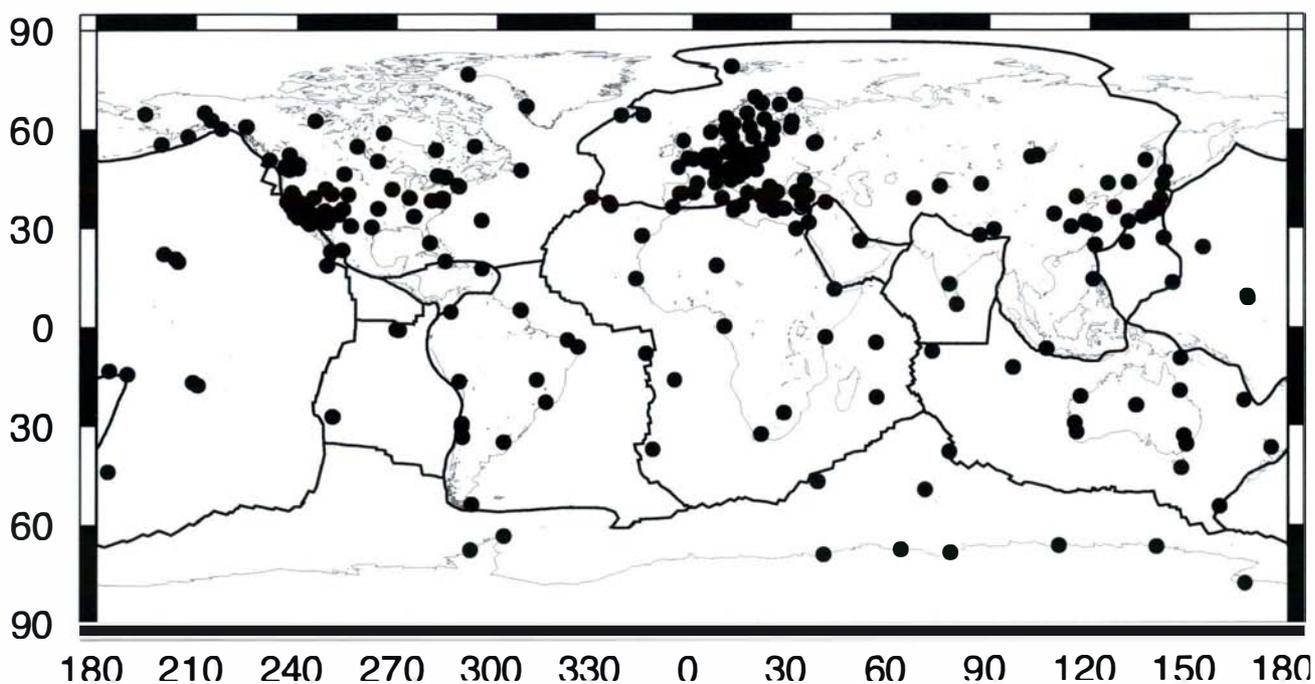


figure B.7.2 : répartition des 290 sites de l'ITRF96

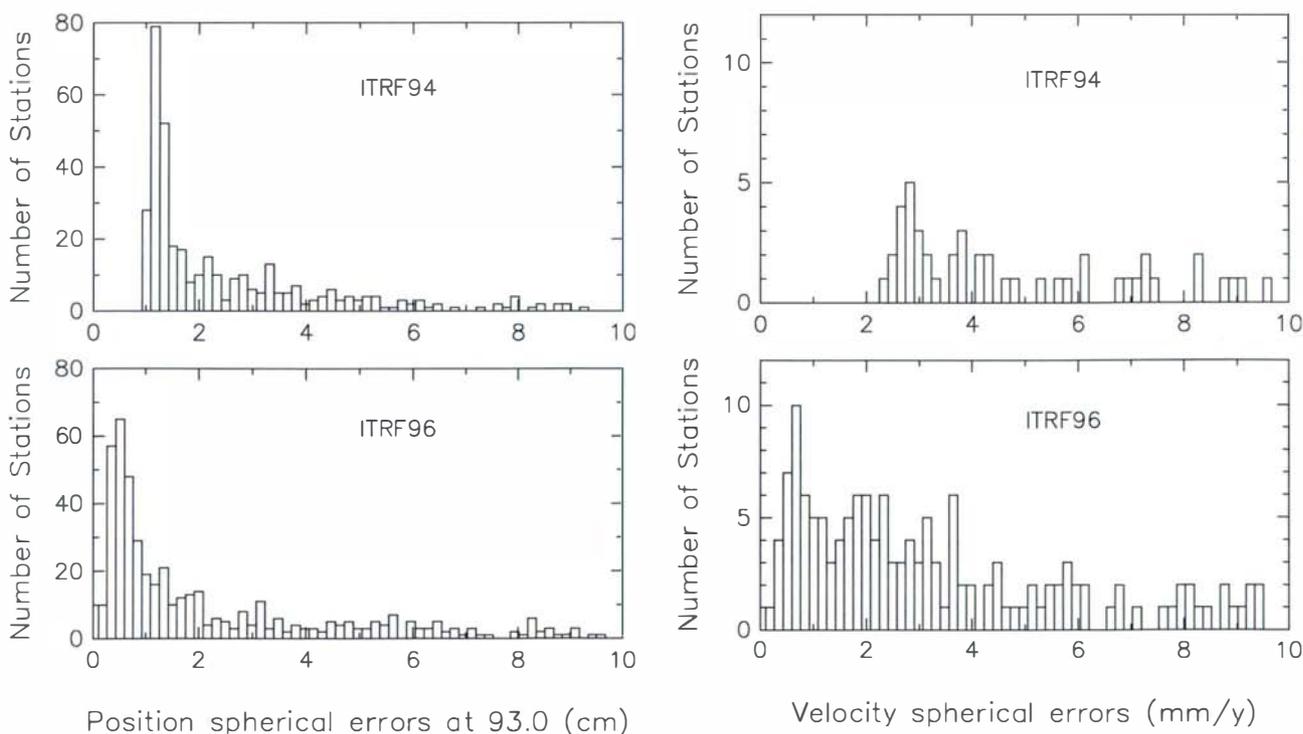


figure B.7.3 : erreurs sphériques des positions (en cm et à l'époque 93.0) et vitesses (en mm/an) ITRF94 et ITRF96

Analyse des résultats de l'ITRF96 et conclusions

L'étude de la qualité des résultats de l'ITRF96 peut être vue sous différents angles. Nous avons sélectionné ici quelques éléments permettant d'avoir une idée de l'apport de l'ITRF96 par rapport aux réalisations précédentes :

- en terme de réseau des stations, la figure B.7.2 montre la répartition des 290 sites de l'ITRF96, faisant apparaître une couverture assez homogène de la surface terrestre,
- la qualité de l'ajustement de l'ITRF96 peut être jugée par celle des solutions individuelles qui le composent. La qualité de ces solutions peut être reflétée par les erreurs moyennes quadratiques pondérées (RMS) en positions et en vitesses données dans le tableau B.7.1. Le meilleur niveau de précision atteint par les techniques considérées, en position, est :
 - inférieur au centimètre pour les solutions VLBI et GPS,
 - de l'ordre de 1 cm pour les solutions SLR et 3 cm pour DORIS,

et en vitesse :

- 2 mm/an pour les solutions VLBI et SLR,
 - 4 mm/an pour les solutions GPS,
 - 8 mm/an pour les solutions DORIS.
- les RMS des solutions individuelles donnés dans le tableau B.7.1 sont cohérents avec les erreurs formelles issues de l'ajustement (voir figure B.7.3). La figure B.7.3 illustre les erreurs sphériques (en positions et en vitesses) pour l'ITRF96 et, à titre de comparaison, pour l'ITRF94. On peut aisément constater qu'il y a une nette amélioration de l'ITRF96 par rapport à l'ITRF94. Contrairement à l'ITRF94, l'ITRF96 possède plus de deux cents stations ayant une précision en positions meilleure que le centimètre. Un effet comparable peut être constaté pour les vitesses où environ 30% des stations possèdent des vitesses estimées à mieux que 3 mm/an,
- la définition de l'ITRF96, en termes de repère de référence terrestre, est telle que l'origine, l'échelle, l'orientation et l'évolution temporelle sont, par construction, les mêmes que pour l'ITRF94. Les deux caractéristiques ayant un sens physique pour un repère de référence terrestre, sont l'origine et l'échelle. La première exprime, en théorie, le centre des masses moyen de la Terre pour les techniques dynamiques, SLR, GPS, DORIS. Quant à l'échelle, elle est influencée par les propriétés physiques des milieux traversés par les ondes électromagnétiques ou radio utilisées dans les techniques de géodésie spatiales. Basés sur les résultats de l'ITRF96, les écarts les plus larges (à l'exception de deux «outliers») entre les solutions individuelles sont respectivement de l'ordre de 4 cm pour l'origine, et de l'ordre de $4 \cdot 10^{-9}$ pour l'échelle.

Références

- [GRAFAREND 84] E. Grafarend : *Variance-covariance-component estimation of Helmert type in the Gauss-Helmert model*, Zeitschrift für Vermessungswesen, 109, pp. 34-44, 1984.
- [RAO, KLEFFE 73] CR. Rao & J. Kleffe : *Linear Statistical Inference and its Applications*, 2nd ed., John Wiley and sons, 1973.
- [RAO 88] C.R. Rao : *Estimation of variance components and applications*, North-Holland, 1988.

Publications

- [ALTAMIMI 97] Z. Altamimi : *Analyse d'un logiciel de combinaison de positions et vitesses tridimensionnelles*, publication du laboratoire LAREG MM017, 1997.
- [BOUCHER 97] C. Boucher : *ITRF issues related to IGS*, IGS Governing Board, Business Meeting, Pasadena, USA, March 15 1997.
- [BOUCHER 97] C. Boucher : *ITRF past, present and future*, IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, Brazil, 1997.
- [BOUCHER et al 97] C. Boucher, Z. Altamimi & P.Sillard : *The ITRF96 realization of the International Terrestrial Reference System*, Proceedings of the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, Brazil, 1997.
- [SILLARD, ALTAMIMI 97] P. Sillard & Z. Altamimi : *Manuel de description et d'utilisation du logiciel CATREF*, publication du laboratoire LAREG SP005, 1997.

B.8 Détermination des variations du géocentre

Patrick Sillard

Résumé

L'amélioration constante de la précision des mesures de géodésie spatiale rend possible l'étude de phénomènes géophysiques globaux. Les variations du centre des masses de la Terre déterminées par les techniques dynamiques de positionnement sont devenues, récemment, une illustration intéressante des capacités, en limite de précision, de la géodésie. La télémétrie LASER sur satellite propose depuis un certain nombre d'années des déterminations du mouvement du centre des masses aujourd'hui compatibles avec les prédictions théoriques. La technique DORIS, plus sensible à la gravité terrestre que GPS dispose d'un potentiel intéressant. Le présent article, faisant suite à une campagne d'étude organisée par le service international de la rotation terrestre durant l'année 1998 et ayant suscité la contribution des grands laboratoires de géodésie spatiale mondiaux, s'attache à évaluer l'apport de DORIS dans ce domaine, en particulier par rapport aux autres techniques.

Contexte de l'étude

Le service international de la rotation terrestre (IERS) est un service scientifique de l'union astronomique internationale (UAI) et de l'union géodésique et géophysique internationale (UGGI). Ce service est en charge des références globales, tant terrestres que célestes, dans l'optique de réaliser ces références dans le cadre d'un modèle suffisamment fin pour ne pas engendrer d'erreur de modélisation sur les mesures modernes. Les références de l'IERS comprennent trois grands volets : le système international de référence céleste, réalisé par un catalogue de positions de radio-sources extra-galactiques; la rotation de la Terre, réalisée par une série temporelle de paramètres d'orientation de la Terre; le système international de référence terrestre, réalisé par un jeu de coordonnées et de vitesses de déplacement de stations terrestres [FEISSEL 97].

Ces dernières sont positionnées à l'aide des meilleures techniques de positionnement disponibles actuellement : interférométrie à très longue base (VLBI), télémétrie LASER sur satellite, DORIS et GPS. Dans le domaine des systèmes de référence, la précision du positionnement s'est considérablement accrue depuis quelques temps, essentiellement avec l'émergence de techniques «souples» telles que DORIS ou GPS. Ainsi, dans l'ITRF96 [BOUCHER et al 98] la moitié des points sont positionnés avec une précision théorique inférieure au centimètre. Il est donc désormais possible de s'intéresser à des phénomènes physiques d'extension globale et d'amplitude inférieure au centimètre. C'est précisément le cas des variations supposées du centre des masses de la Terre. L'IERS a donc tenté de fédérer les efforts d'un certain nombre de groupes de géodésie spatiale autour du problème posé par la mesure des variations de la position du géocentre. Une campagne internationale est organisée, sous l'égide de l'IERS durant l'année 1998 [RAY 98], et la conclusion de cette campagne donnera lieu, en décembre 1998, à une session spéciale de l'American Geophysical Union Fall Meeting, où divers résultats ont été présentés. Il s'avère que les techniques de géodésie spatiale sont effectivement en mesure de détecter des signaux pseudo-périodiques de l'origine du système de référence dans lequel sont exprimées les mesures individuelles. Il n'en reste pas moins qu'un seuil demeure à franchir avant que les signaux observés par chaque technique soient réputés cohérents et physiquement compatibles.

Physique du phénomène

La répartition des masses du système Terre est globalement variable. Ceci implique des effets sur le centre des masses qui se traduisent par des variations de positions par rapport à une référence fixe. Le problème sera d'être capable de construire une référence fixe et de la maintenir dans le temps. Au delà de ce problème, les principales causes de redistribution des masses de la Terre sont d'origine atmosphériques, océaniques et environnementales. On trouvera une analyse détaillée et théorique des diverses origines dans [DONG et al 97].

Les chiffres donnés ci-après proviennent, pour la plupart, de l'étude précédente. L'étude des variations du géocentre est un sujet qui, du point de vue théorique, a déjà été étudié depuis fort longtemps [STOLZ 76]. Par ailleurs, des études approfondies sur la faisabilité d'une détermination, par géodésie spatiale, des variations du centre des masses de la Terre ont été développées depuis quelques années : [VIGUE et al 92] [WATKINS, EANES 93]. Dans tous les cas, les redistributions de masses de surface engendrent indirectement des variations dans la position du centre des masses de la Terre par effet de charge. Ce sont ces effets qui actuellement sont supposés être la cause principale des variations du géocentre.

Atmosphère

La variation due aux redistributions de masses dans l'atmosphère a pour amplitude un à deux millimètres et présente, sensiblement, une signature fréquentielle annuelle et semi-annuelle.

Océan

La variation du géocentre dûe à l'océan est essentiellement la conséquence de la circulation océanique indépendamment des effets de marées. L'amplitude du signal est de l'ordre du millimètre. Les effets sont également de période annuelle.

Eau de surface

Cet aspect est basé sur l'identification des grands réservoirs d'eau douce dont les variations de niveau engendrent des variations importantes d'effet de charge sur la surface de la Terre. L'amplitude estimée est de l'ordre de trois millimètres pour un terme annuel et un millimètre pour un terme semi-annuel.

Les autres effets (niveau des mers, fontes des glaciers) correspondent à des effets séculaires non significatifs à la fréquence des observations de géodésie spatiale.

Méthodologie de la mesure

D'une manière générale, le géocentre est implicitement choisi comme centre des masses de la Terre, pour la dynamique du satellite. Le centre des masses instantané sera donc accessible, moyennant quelques approximations, aux techniques dynamiques de géodésie spatiale. Cette hypothèse conduit, logiquement, à s'intéresser aux variations de l'origine du système de référence dans lequel est exprimée l'orbite du satellite, et au delà, dans lequel sera exprimé le jeu de coordonnées de stations découlant de l'ajustement global orbite - positions de stations terrestres.

Dans les trois approches proposées ci-après, les deux premières font appel à des séries temporelles de réalisations de systèmes de référence. La troisième montre qu'il est possible, dans le calcul d'orbite, d'ajuster des variations de positions de stations dues aux variations de la position de géocentre.

Supposons un géocentre de position constante durant la période d'intégration de l'arc d'orbite calculé. La force de gravitation à laquelle est soumis le satellite est radiale dirigée vers le géocentre instantané précédent. Si en outre, on suppose le modèle champ de gravité utilisé pour l'intégration d'orbite, en régime permanent, indépendant de la position du géocentre, le système dans lequel est intégrée l'orbite du satellite est celui centré au géocentre instantané. Le système de référence réalisé lors du calcul d'orbite précédent a pour origine le géocentre instantané. De ce raisonnement découle les mesures proposées aux paragraphes suivants. Supposons, à présent, que l'on analyse l'orbite du satellite à partir de plusieurs arcs successifs.

La prolongation de l'hypothèse d'un arc intégré dans un système de référence centré au géocentre conduit à considérer que ces arcs ne réalisent pas les mêmes systèmes de référence. Il est donc possible d'analyser les variations du géocentre comme un mouvement d'ensemble des stations dans un système de référence fixe dans le temps. Ce point est évoqué au paragraphe ci-après.

Comparaison des jeux individuels à une référence externe

Cette approche consiste à comparer les réalisations successives de systèmes de référence par rapport à un jeu de coordonnées de stations réalisant un autre système de référence. Ce jeu caractérisera la référence fixe à laquelle on cherchera à rapporter les variations du géocentre. La comparaison consistera à ajuster des paramètres de translation entre les jeux individuels et le jeu référence.

Le problème de cette méthode réside dans le fait que dans la détermination des paramètres de translation, on introduit l'erreur de la référence. La bonne méthode consiste à se servir de la variance (quand elle existe) du jeu de référence, ainsi que de la variance du jeu individuel pour ajuster les paramètres de transformation. Il n'en demeure pas moins que la référence externe ne permet pas d'assurer l'homogénéité des paramètres de translation dans le temps, surtout lorsque la qualité et la distribution du réseau de stations servant à générer les jeux individuels varie elle-même dans le temps.

Comparaison à une référence interne

Pour éviter le problème évoqué dans le paragraphe précédent relatif à l'éventuelle mauvaise qualité de la référence externe, une technique consiste à travailler à l'aide d'une référence interne aux mesures. Pour être précis, il est possible dans un même ajustement de déterminer, d'une part une référence commune (jeu de coordonnées de stations combiné à partir de divers jeux individuels), et d'autre part, un lot de paramètres de transformation entre chacun des jeux individuels et le jeu combiné. Pour plus d'informations, le lecteur est invité à se reporter à [BOUCHER 98], ces techniques correspondant en tout point à celles utilisées pour le calcul de la version 1996 du repère international de référence terrestre (ITRF96).

Ajustement dans un calcul d'orbite

Dans la mesure où les mouvements du géocentre peuvent être interprétés comme des mouvements d'ensemble du réseau de stations, on aboutit à une méthode de détermination des variations du géocentre à partir du calcul d'orbite si on impose la structure de la variation (par exemple, variation périodique de période connue). Cette méthode est utilisée au GRGS-Toulouse dans le logiciel GINS et sera utilisée lors du calcul du champ de potentiel terrestre GRIM5 [Biancale].

Les résultats

La présente partie comporte des résultats obtenus par quelques centres d'analyse de géodésie spatiale qui ont été soumis lors de la campagne de l'IERS sur la détermination du géocentre.

Dans chacune des séries temporelles analysées, une régression linéaire, pondérée par les variances sur chaque détermination, a été menée, les paramètres de la régression correspondant à l'équation (1) :

- un terme de période annuelle,
- un terme de période semi-annuelle,
- un terme constant, correspondant à un changement de système de référence entre les diverses séries pour les rendre relatives à une même référence (dans l'absolu, il pourrait être également opportun d'ajuster une dérive temporelle).

Pour un signal $s(t)$, l'analyse est conduite comme suit (terme annuel indicé 1, et terme semi-annuel indicé 1/2; la phase est calculée par rapport au 1er janvier) :

$$s(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_{1/2} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (1)$$

table B.8.1 : termes annuels et semi-annuels en X

Série	A ₁ mm	φ ₁ deg.	A _{1/2} mm	φ _{1/2} deg.
LASER-CSR	2,2 ±0,7	63 ±9	1,1 ±0,7	73 ±18
DORIS-GRGS	3,2 ±1,0	156 ±9	1,6 ±1,0	117 ±18
DORIS-IGN	7,4 ±6,6	105 ±26	3,9 ±6,7	23 ±48
GPS-JPL	9,2 ±2,8	56 ±9	6,3 ±2,8	153 ±12
Combiné GPS-JPL + DORIS-IGN	6,6 ±3,9	61 ±17	2,0 ±4,0	117 ±56

table B.8.2 : termes annuels et semi-annuels en Y

Centre	A ₁ mm	φ ₁ deg.	A _{1/2} mm	φ _{1/2} deg.
LASER-CSR	3,2 ±0,8	61 ±7	0,8 ±0,8	122 ±31
DORIS-GRGS	4,2 ±1,3	60 ±9	0,9 ±1,3	80 ±42
DORIS-IGN	9,7 ±2,8	142 ±8	3,1 ±2,7	63 ±26
GPS-JPL	8,5 ±2,9	1 ±9	0,2 ±2,7	62 ±495
Combiné GPS-JPL + DORIS-IGN	4,7 ±2,8	137 ±17	1,7 ±2,7	21 ±46

table B.8.3 : termes annuels et semi-annuels en Z

Centre	A_1	φ_1	$A_{1/2}$	$\varphi_{1/2}$
	mm	deg.	mm	deg.
LASER-CSR	2,8 ±1,8	49 ±23	0,5 ±1,8	75 ±96
DORIS-GRGS	5,6 ±5,2	51 ±47	0,9 ±5,2	51 ±159
DORIS-IGN	14,7 ±6,5	4 ±25	6,4 ±6,5	123 ±29
GPS-JPL	27,0 ±11,9	171 ±35	19,4 ±10,3	157 ±15
Combiné GPS-JPL + DORIS-IGN	13,0 ±10,7	169 ±47	16,7 ±10,7	124 ±18

Télémétrie LASER sur satellite

Cette technique est potentiellement la technique la plus sensible aux variations de position du géocentre : la dynamique du satellite est bien connue et permet une analyse très fine des effets gravitationnels, aux nombres desquels on peut compter les variations du géocentre.

Les résultats présentés aux tables B.8.1, B.8.2 et B.8.3, ainsi qu'à la figure B.8.4 ont été obtenus par le Center for Space Research (CSR) et soumis lors de la campagne IERS sur le géocentre [EANES et al 97].

On constate, tout d'abord, que les incertitudes obtenues sur les paramètres de la régression des données LASER sont les plus petites obtenues, ce qui confirme la grande sensibilité de cette technique aux variations du champ de gravité. Ceci justifie également l'intérêt qu'il faut porter aux déterminations du géocentre proposées par cette technique.

On peut constater que les variations théoriques du géocentre sont perçues au même niveau d'intensité par la télémétrie LASER. Seules les déterminations de cette technique semblent compatibles avec la théorie. A un degré légèrement moindre, DORIS semble en mesure de confirmer ce niveau de magnitude des variations (cf. § «DORIS»).

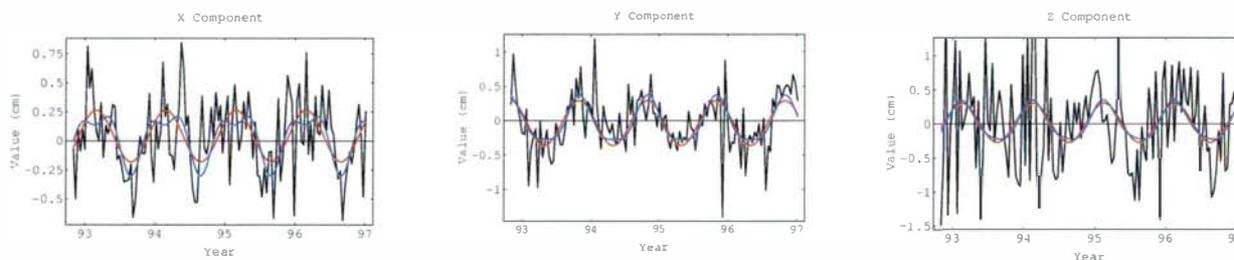


figure B.8.4 : composantes du géocentre LASER (rouge : annuel - bleu : annuel + semi annuel)

DORIS

Deux centres d'analyse ont fourni des résultats lors de la campagne de l'IERS : le GRGS-Toulouse et l'IGN. On trouvera aux tables B.8.1, B.8.2 et B.8.3, les résultats obtenus.

La série DORIS-GRGS provient d'une série temporelle de paramètres de positions du géocentre [BOUILLE 97].

La série DORIS-IGN est issue d'une combinaison de solutions mensuelles au sein d'un processus où des paramètres de transformation ont été ajustés entre la solution combinée et chacune des solutions mensuelles [SILLARD et al 97] [WILLIS et al 97] conformément au § «Comparaison à une référence interne».

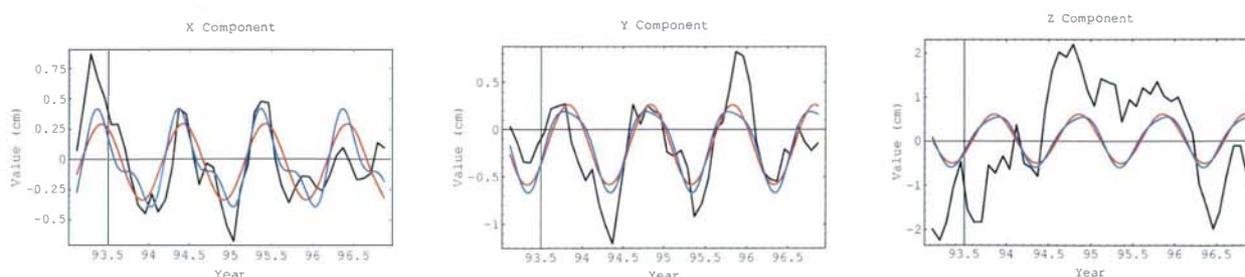


figure B.8.5 : composantes du géocentre DORIS-GRGS (rouge : annuel - bleu : annuel + semi annuel)

Dans l'ensemble, la conclusion générale est que les résultats obtenus ne sont pas extrêmement cohérents : les amplitudes des séries IGN semblent systématiquement surévaluées par rapport à celles obtenues par le GRGS. Les phases ne sont pas cohérentes non plus. De plus, les termes semi-annuels sont, sauf éventuellement en X pour la série du GRGS, non significatifs. Il convient d'être prudent sur ces résultats qui tendraient à penser que DORIS ne permet pas réellement, à l'heure actuelle, de déterminer des variations physiques du géocentre.

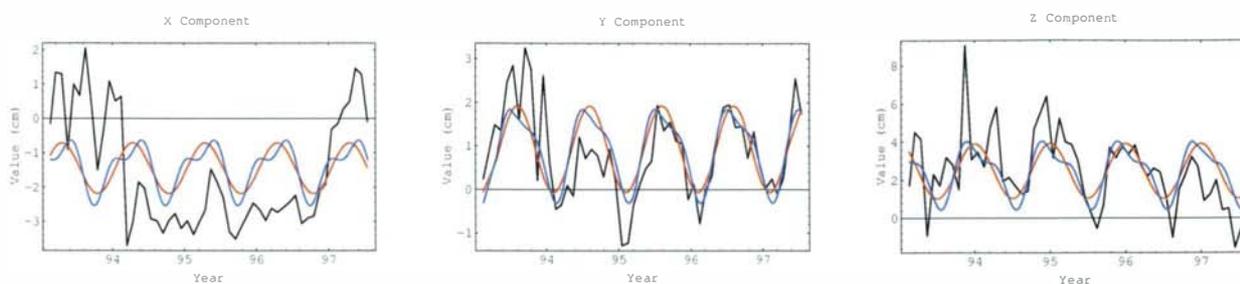


figure B.8.6 : composantes du géocentre DORIS-IGN (rouge : annuel - bleu : annuel + semi annuel)

GPS

La technique GPS présente une faiblesse par rapport aux précédentes techniques envisagées : l'altitude des satellites GPS est beaucoup plus élevée que l'altitude des satellites DORIS et des satellites LASER, de sorte que GPS est potentiellement moins sensible que les autres techniques aux détails du champ de gravité. Toutefois, il demeure intéressant d'étudier l'apport éventuel de cette technique aux autres déterminations.

La série de résultats a été obtenue en combinant des jeux hebdomadaires de coordonnées de stations fournies au service international GPS pour la géodynamique (IGS) par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) [SILLARD et al 97].

On constate que les résultats sont relativement différents des autres résultats obtenus, ni plus ni moins cohérents en réalité. On trouvera les graphes des variations obtenues à la figure B.8.7.

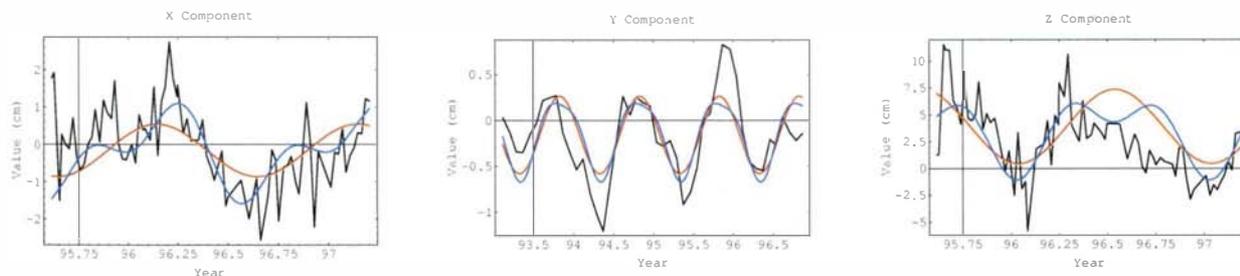


figure B.8.7 : composantes du géocentre GPS (rouge : annuel - bleu : annuel + semi annuel)

Détermination combinée GPS et DORIS

Pour finir, et c'est un avantage de la méthode décrite au § «Comparaison à une référence interne», un calcul de combinaison simultanée a été effectué à partir des séries temporelles de jeux de coordonnées DORIS-IGN et GPS-JPL. Les paramètres de transformations entre le système combiné d'une part et les jeux individuels DORIS et GPS d'autre part, ont été contraints à être égaux aux mêmes dates. La combinaison s'appuie sur les rattachements connus et utilisés au bureau central de l'IERS entre les réseaux GPS et DORIS. On trouvera à la figure B.8.8 une illustration des variations obtenues [SILLARD et al 97].

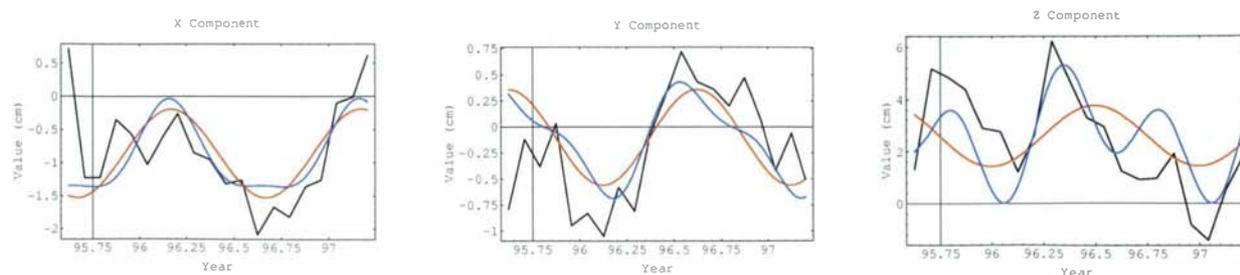


figure B.8.8 : composantes du géocentre combiné GPS+DORIS (rouge : annuel - bleu : annuel + semi annuel)

Comme on pouvait s'y attendre, devant la relative incohérence des déterminations séparées DORIS et GPS, le signal combiné est de moins forte amplitude que les signaux originaux (DORIS et GPS). Le signal est parfois d'ordre de grandeur plus satisfaisant, en regard de la théorie, que les déterminations individuelles. Cette technique pourrait être employée, de façon routinière, afin de déterminer les variations du géocentre, surtout si la technique LASER est en mesure de fournir des séries temporelles de jeux de coordonnées de stations.

Discussion

En guise de conclusion, il est intéressant d'étudier les résultats obtenus pour chacun des signaux ajustés, dans l'espace des phases. En effet, ce sera par ce biais que l'on sera en mesure de comprendre si les signaux détectés sont statistiquement cohérents ou non. On trouvera à la figure B.8.9 les tracés correspondants aux signaux annuels selon les trois axes du système de référence, et à la figure B.8.10 les tracés équivalents pour les signaux semi-annuels. L'échelle des tracés est le millimètre, et la phase est représentée par rapport à l'axe des abscisses.

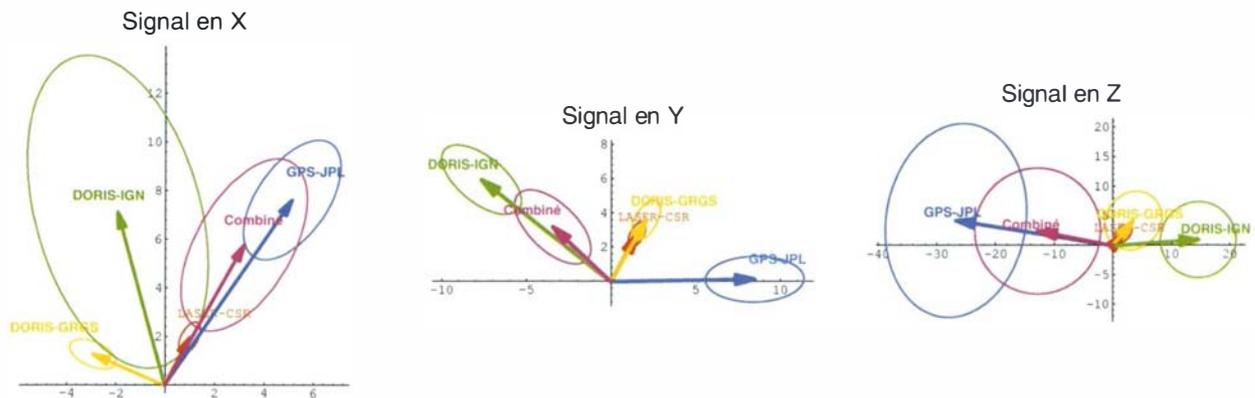


figure B.8.9 : signaux annuels dans l'espace des phases

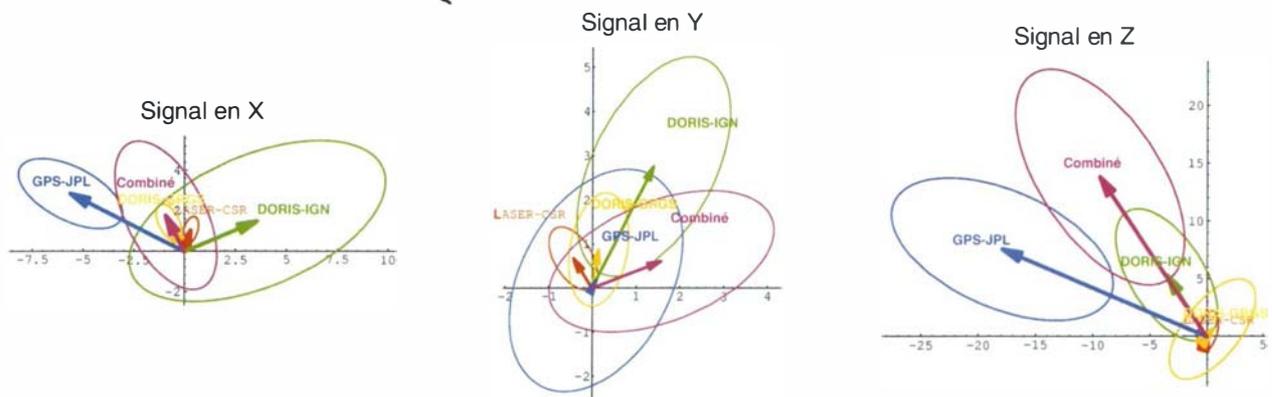


figure B.8.10 : signaux semi-annuels dans l'espace des phases

On constate, au vu de ces graphiques, que les résultats ne sont pas probants : il est certainement encore trop tôt pour affirmer que la géodésie spatiale est capable de détecter les variations du géocentre. Le terme annuel, dans les séries étudiées est souvent significatif. Ce n'est, en général pas le cas du terme semi-annuel. A l'heure actuelle, les déterminations, essentiellement en phase, sont toutefois trop incohérentes pour conclure. On peut néanmoins observer que, outre la technique LASER, DORIS peut, selon les traitements employés, mesurer des signaux d'amplitude convenable au regard des variations théoriques envisagées (DORIS-GRGS et LASER-CSR). Du reste ces déterminations ne sont pas fondamentalement incohérentes en phase, ce qui permet légitimement de conclure que cette expérience pleine de promesses, est à poursuivre.

Références

- [BOUILLE, CAZENAVE 97] F. Bouillé & A. Cazenave : *Geocenter variations derived from 4 years of DORIS data on Spot-2, Spot-3 and Topex-Poseidon*. Am. Geophys. Un. Fall Meeting, 1997.
- [DONG et al 97] D. Dong, J.O. Dickey, Y.Chao & M.K. Cheng : *Geocenter variations caused by atmosphere, ocean and surface ground water*, in Geophys. Res. Lett., 24:1867-1870, 1997.
- [EANES et al 97] R. Eanes, S. Kar, S. Bettadpur & M. Watkins : *Low-frequency Geocenter motion determined from SLR tracking*, Am. Geophys. Un. Fall Meeting, 1997.
- [FEISSEL 97] M. Feissel, editor (1997) *1996 IERS Annual Report.*, Int. Earth Rotation Serv., 1997.
- [HEFLIN 97] M. Heflin : *Geocenter estimates from the Global Positioning System*. Am. Geophys. Un. Fall Meeting, 1997.
- [RAY 98] J. Ray : *1998 IERS geocenter campaign (to be published)*. Rapport technique 25, Int. Earth Rotation Serv., 1998.
- [STOLZ 76] A. Stolz : *Changes in the position of the geocenter due to variations in sea-level*. Bull. Géodésique, 50:159-168, 1976.
- [VIGUE et al 92] Y. Vigue, S.M. Lichten, G. Blewitt, MB. Heflin & RP. Malla : *Precise determination of Earth's center of mass using measurements from the Global Positioning System*. Geophys. Res. Lett., 19:1487-1490, 1992.
- [WATKINS, EANES 93] M.M. Watkins & R.J. Eanes : *Long-term changes in the Earth's shape, rotation and geocenter*. Adv. in Space Res., 13:251-255, 1993.

Publications

- [BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *Results and analysis of the ITRF96*, Rapport technique 24, Int. Earth Rotation Serv., 1998.
- [SILLARD et al 97] P. Sillard, P. Willis & C. Boucher : *GPS and DORIS combined Geocenter motion from reference frame time series analysis*, Am. Geophys. Un. Fall Meeting, 1997.
- [WILLIS et al 97] P. Willis, P. Sillard & C. Boucher : *Processing DORIS/IERS data in a free-network approach for geocenter variations monitoring*, Am. Geophys. Un. Fall Meeting, 1997.

B.9 Marégraphie et géodésie spatiale : bilan d'un travail de recherche sur leur synergie

Guy Wöppelmann

Résumé

Cet article se propose d'exposer brièvement les conclusions et résultats obtenus au cours du travail de thèse de Guy Wöppelmann. Le travail s'est effectué sous la direction de C. Le Provost, Directeur de recherches au CNRS, et de Claude Boucher, Directeur du Laboratoire de Recherches en Géodésie (LAREG) de l'IGN. La thèse fut présentée le 23 juin 1997 devant le jury présidé par François Barlier, Professeur, et constitué des directeurs de thèse cités ci-dessus, ainsi que des rapporteurs : Georges Balmino, Docteur, et Paolo-Antonio Pirazzoli, Directeur de recherches au CNRS. Le titre du sujet était le "rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale".

En théorie simple, il n'est pourtant pas facile en pratique d'obtenir des résultats satisfaisants de la synergie des techniques de marégraphie et de géodésie. Peu de résultats sont en effet disponibles à l'heure actuelle. Chaque maillon de la chaîne de mesure demande une attention particulière si l'on veut atteindre les exigences imposées par les océanographes qui s'intéressent aux variations eustatiques. L'application visée était la détermination des variations à long terme du niveau des mers, nous avons revu les différents indicateurs de variation du niveau de la mer. Nous avons examiné les concepts de niveau de la mer, de variations eustatiques, de système climatique, mais également de systèmes de référence terrestres et de références verticales. L'idée d'une élévation récente du niveau des mers en relation avec un réchauffement climatique de cause anthropique a été confrontée aux observations fournies par les marégraphes. L'analyse de leurs séries chronologiques, qui remontent parfois au début du XIXe siècle, a permis de dégager les problèmes et les apports nécessaires pour résoudre cette question, notamment au regard des résultats et progrès de la géodésie spatiale.

Les objets étudiés au cours du travail de thèse ont été nombreux et variés. Tout d'abord, les marégraphes : comment fonctionnent-ils ? Quelle est la nature de la grandeur mesurée ? Quelles sont les causes de variation de cette grandeur ? Les sources d'erreur systématique ? Les données disponibles ? Leur précision ? Une attention particulière a été dédiée au cas particulier du marégraphe de Marseille, dont l'instrument original fournit des observations du niveau de la mer depuis 1885. Nous avons réalisé en parallèle un travail analogue pour les systèmes spatiaux de positionnement précis. Les engagements du directeur de thèse, C. Le Provost, auprès de la communauté internationale nous ont conduit à effectuer une reconnaissance géodésique dans les "îles de la Désolation" (Kerguelen) en 1994, où un marégraphe à pression fonctionne depuis 1992. Des mesures GPS ont été effectuées par la suite. Une étude détaillée des références verticales accessibles à proximité des marégraphes a été effectuée. Plus spécifiquement, nous avons examiné la qualité et les performances du système de référence terrestre international, l'ITRS, à travers ses réalisations récentes : ITRF94 et ITRF96.

Nous encourageons enfin le lecteur désireux d'avoir plus de détails sur les questions ébauchées dans cet article à se procurer un exemplaire du mémoire de thèse auprès du centre de documentation de l'IGN ou auprès du laboratoire LAREG.

Introduction : contexte de l'étude

L'intérêt de l'IGN pour la marégraphie et le niveau de la mer remonte au siècle dernier, notamment aux fins de résoudre certaines questions associées aux références verticales. Le soin apporté à la construction de l'observatoire de l'anse Calvo et à son instrument marégraphique, les deux éléments principaux du Marégraphe de Marseille, ainsi que l'invention du médimarémètre par Charles Lallemand, témoignent, entre autres exemples, de cet intérêt passé [VIGNAL 35, HURAUULT 55, ou DUCHER 64].

Aujourd'hui, l'attention portée à la marégraphie demeure, quoique moins accentuée, puisque l'IGN figure parmi les premiers organismes promoteurs du concept synergique de rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale, et des toutes premières campagnes GPS orientées vers les marégraphes (1986).

L'étude des variations séculaires du niveau des mers est un sujet situé au carrefour de nombreuses disciplines des Sciences de la Terre, où la géodésie est également susceptible de concourir. Bien que le thème de recherche ne soit pas récent, il connaît un regain d'intérêt important depuis quelques années, non seulement à cause de l'effet médiatique provoqué par les scénarios dramatiques de changement climatique dû à l'effet de serre, mais surtout à cause des nouvelles possibilités techniques offertes par la géodésie spatiale en synergie avec la marégraphie.

L'étude du système climatique de la Terre montre que sa modélisation est fort complexe. La complexité des modèles n'est pas tant liée à la diversité des sous-systèmes du climat et aux processus physiques considérés, qu'à leur

formulation mathématique compliquée, reposant sur des équations souvent non linéaires. Dans ce cadre difficile, le niveau de la mer, et notamment ses variations eustatiques, présentent un intérêt scientifique certain comme indicateur et paramètre climatique.

Les données sur le niveau de la mer sont variées : géomorphologiques, archéologiques, isotopiques, etc. Leur revue montre que chacune présente un intérêt dans l'étude et la compréhension des causes de variation du niveau des mers à long terme. La marégraphie et l'altimétrie radar sont les sources de données les plus récentes dont on dispose, ou plutôt, qui témoignent d'un passé récent. En particulier, la marégraphie remonte au début du XIXe siècle, et les séries temporelles enregistrées en quelques marégraphes séculaires apparaissent comme des données d'une valeur scientifique inestimable pour l'étude et la compréhension des variations à long terme du niveau des mers liées à des changements climatiques récents.

Concepts de niveau moyen de la mer et d'eustatisme

Niveau moyen de la mer

Bien qu'elle soit largement utilisée, la notion de niveau de la mer n'en reste pas moins vague comme le remarquent quelques scientifiques. C'est pourquoi, nous avons essayé de la clarifier quelque peu et de comprendre la raison de ce flou auquel contribue la multitude d'expressions dérivées telles que : niveau global de la mer, niveau moyen de la mer, niveau des mers, etc.

Dans l'expression "niveau de la mer", nous avons, d'une part, le concept implicite de surface de la mer, et d'autre part, celui de niveau. La surface de la mer est l'interface qui sépare les deux grands fluides du système climatique que sont l'atmosphère et l'océan. L'idée de niveau se définit par ailleurs comme le degré d'élévation d'une surface, d'une ligne ou d'un point lui appartenant, par rapport à une surface de référence qui lui est parallèle. Aussi, une surface de niveau est une surface dont tous les points sont au même niveau, formant en particulier une surface normale aux lignes de champ de la pesanteur terrestre. Elle est également connue sous la désignation de surface équipotentielle. Notons toutefois que cette terminologie ne se restreint pas au seul champ qui est généré par la force de la pesanteur.

La surface de la mer ne peut être considérée comme une surface de niveau car elle change sans cesse, d'un jour à l'autre, et d'un lieu à l'autre. Le spectre de ces fluctuations dans l'espace et dans le temps est large. Dans ce cas, en atténuant fortement la variabilité temporelle par le calcul de moyennes, l'idée n'est plus aussi absurde. La surface moyenne de la mer diffère peu d'une surface de niveau, l'écart-typique étant souvent inférieur au mètre. Elle sert d'ailleurs à réaliser la surface équipotentielle de référence mondiale appelée le géoïde. Leurs écarts résultent de l'attraction gravitationnelle des autres astres du système solaire, des courants océaniques, des variations de densité et des effets météorologiques, qui n'ont pas pu être éliminés par le calcul de moyennes, en raison de leur nature systématique et non périodique sur l'intervalle de temps considéré.

Le caractère vague est en partie dû à la notion de moyenne. Le niveau moyen de la mer se réfère de fait à une moyenne dans le temps. Elle n'a donc de sens que si la période de temps est spécifiée, et si les fluctuations de période inférieure sont éliminées. Lorsque l'on souhaite se rapporter à la moyenne spatiale du niveau de l'ensemble des mers, il convient plutôt d'utiliser l'expression niveau global de la mer ou niveau des mers. Le qualificatif global signifiant mondial, et les mers étant dans ce cas un terme générique qui comprend les océans et les grandes étendues marines reliées. Par ailleurs, la surface de référence des valeurs de niveau doit être en accord avec la cohérence spatiale de la grandeur considérée. Ainsi, le niveau des mers sera, par exemple, défini par rapport à un ellipsoïde associé à un système de référence terrestre mondial, ou encore par rapport au géoïde. En revanche, le niveau de la mer peut être déterminé par rapport à un plan horizontal défini localement à travers un ou plusieurs repères matériels liés à l'écorce terrestre, ou encore, par un réseau de nivellement réalisant un système national d'altitudes.

Dans notre étude, le niveau moyen de la mer se rapporte à une période de un an. Il est estimé à partir d'un seul marégraphe. Le niveau moyen des mers se rapporte à la même période de temps, mais il est estimé à partir d'un ensemble de marégraphes répartis sur le globe.

Eustatisme

Le *Grand Larousse Universel* [1989] définit l'eustatisme comme la "variation lente du niveau des océans et des mers, d'origine tectonique ou climatique" alors que le *Petit Larousse* [1963] limite sa définition à la "théorie qui attribue aux glaciations les variations générales du niveau des mers". Quant au *Petit Robert* [1991], on peut y lire : "mouvements eustatiques, variations du niveau de la mer dues notamment à la fonte des glaces et à la glaciation". Enfin, *la Nouvelle Encyclopédie Bordas* [1985] donne la définition suivante : "théorie selon laquelle la variation du niveau des mers serait due aux glaciations; ces variations sont dites eustatiques". Au regard de ces définitions, un esprit curieux ne manque pas de ressentir une certaine frustration face à cette absence de détails que l'on n'est pas habitué à trouver dans les grandes encyclopédies. Les informations fournies sur l'eustatisme sont réduites au minimum nécessaire pour donner une idée vague du sujet. L'explication se trouverait dans la complexité du phénomène, encore mal appréhendé. Cependant, il existe une littérature de plus en plus abondante dans le domaine de l'étude du climat de la Terre et de ses changements,

notamment depuis que l'Homme, prenant conscience des limites de son habitat, la Terre, s'intéresse à son environnement et à l'impact que ses activités ont sur ce dernier.

Les deux éléments intéressants que nous pouvons retenir de ces définitions académiques sont des variations globales et lentes du niveau de la mer. Le tour d'horizon, que nous faisons dans le mémoire de thèse, du système climatique de la Terre, et l'étude de la relation entre les changements climatiques et le niveau des mers apportent une vue plus complète, en précisant notamment les liens et les processus physiques impliqués [WÖPPELMANN 97].

Pugh [1987] et Ekman [1992] définissent les variations eustatiques comme les changements globaux de volume d'eau océanique dus à la fonte ou à la formation de glace continentale, d'une part, et à la dilatation thermique, d'autre part. Mais, beaucoup d'auteurs comprennent dans ces variations d'autres causes qui affectent le niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale [PIRAZZOLI 76, IOC 85]. Par ailleurs, Lisitzin [1974] et Le Provost [1993] limitent la contribution eustatique du changement à long terme du niveau des mers à la fonte des glaces continentales. Lisitzin [1974] reconnaît toutefois, qu'en général d'autres phénomènes, tels que l'isostasie, sont comptés dans les variations eustatiques. Pugh [1987] préfère distinguer les mouvements verticaux de l'écorce terrestre d'étendue régionale en les regroupant sous la désignation "changements épigéniques". Il insiste sur la définition des variations eustatiques du niveau des mers restreinte aux seuls changements de volume d'eau en relation avec la surface occupée par les océans; et ceci malgré les difficultés considérables pour observer ces changements libres des déformations isostatiques des bassins océaniques.

Les variations eustatiques sont par nature lentes comme nous avons pu le voir en étudiant les causes de changement du niveau des mers [WÖPPELMANN 97]. On parle souvent de tendance à long terme du niveau moyen des mers. Mais la notion de long terme est vague et varie selon le problème posé. Aussi, on utilise le terme séculaire, qui précise l'intervalle sur lequel on estime l'évolution moyenne de ce niveau global de la mer.

Lisitzin [1974] remarque que l'élévation eustatique de l'Holocène peut difficilement être considérée comme continue et uniforme. A ce titre, rappelons les trois événements brusques déterminés par Blanchon [1995], qui viennent altérer la variation progressive et lente appréciée par ailleurs. En outre, la distribution mondiale de la température n'est pas uniforme sur l'ensemble des mers [LEVITUS 82], ni l'amplitude de ses variations. Cette remarque s'applique aussi bien à l'échelle saisonnière que séculaire ou millénaire.

L'intérêt du niveau de la mer réside, comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, dans son lien avec les changements climatiques. C'est une grandeur relativement facile à mesurer, qui fournit des indices précieux sur les processus physiques à l'origine de ses variations. Aussi, une connaissance précise des variations eustatiques passées apportera des contraintes aux modèles climatiques, et améliorera leurs prévisions. Aujourd'hui, ces modèles prévoient une élévation globale de la température, en particulier aux hautes latitudes, due à l'injection massive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis l'avènement de l'ère industrielle. Le tableau B.9.1 donne quelques prévisions sur l'évolution du niveau des mers suivant divers scénarios d'émission en gaz à effet de serre.

tableau B.9.1 : prévisions des modèles climatiques suivant divers scénarios d'émission en gaz à effet de serre [IPCC 95]. Les vitesses correspondent à la variation de niveau des mers par rapport à 1990

Année	Prévision basse		Prévision moyenne		Prévision haute	
	Prévision	Vitesse	Prévision	Vitesse	Prévision	Vitesse
2020	2,9 cm	1 mm/an	8,6 cm	2,9 mm/an	18,6 cm	6,2 mm/an
2040	5,7 cm	1,1 mm/an	18,6 cm	3,7 mm/an	38,6 cm	7,7 mm/an
2100	13 cm	1,2 mm/an	55 cm	5 mm/an	110 cm	10 mm/an

Pourtant, contrairement à l'opinion générale, le réchauffement mondial pourrait se traduire, selon quelques auteurs, par une baisse du niveau moyen des mers, et non par une hausse. En effet, le bilan des masses de l'Antarctique deviendrait positif, car le contenu en vapeur d'eau et les précipitations augmenteraient dans une atmosphère plus chaude. L'accumulation de glace serait alors relativement plus importante que la fonte ou le vèlage. La même hypothèse de réchauffement climatique conduirait donc à l'un ou l'autre des deux effets antagonistes suivant les connaissances actuelles, et l'analyse qualitative et quantitative du problème. De nombreux chercheurs admettent une augmentation du niveau moyen des mers d'une dizaine de centimètres au cours du dernier siècle. Cette hypothétique élévation eustatique récente est obtenue de l'analyse des enregistrements de marégraphes.

Analyse des enregistrements des marégraphes

De nombreux chercheurs ont analysé les enregistrements des marégraphes afin d'estimer les variations séculaires du niveau des mers et étudier leur relation avec le changement climatique qui accompagnerait l'injection massive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le tableau B.9.2 et le graphique de la figure B.9.3 présentent un échantillon de résultats de ces analyses.

tableau B.9.2 : estimations de la tendance contemporaine du niveau des mers selon différents auteurs, à partir de leur analyse des enregistrements marégraphiques

N°	Auteurs	Résultats mm/an	N°	Auteurs	Résultats mm/an
1	Vignal (1935)	1 à 2	11	Aubrey (1985)	0 à 3
2	Gutenberg (1941)	1,1 ± 0,8	12	Gornitz & Lebedeff (1987)	1,2 ± 0,3
3	Kuenen (1950)	1,2 à 1,4	13	Barnett (1988)	1,15
4	Lisitzin (1974)	1,1 ± 0,4	14	Trupin & Wahr (1990)	1,75 ± 0,13
5	Fairbridge & Krebs (1962)	1,2	15	Gornitz & Seeber (1990)	1,26 ± 0,78
6	Emery (1980)	3	16	Peltier & Tushingham (1991)	2,4 ± 0,9
7	Gornitz et al (1982)	1,2	17	Emery & Aubrey (1991)	0,8
8	Klige (1982)	1,5	18	Douglas (1991)	1,8 ± 0,1
9	Barnett (1983)	1,54 ± 0,15	19	Mitrovica & Davis (1991)	1,5 ± 0,3
10	Barnett (1984)	1,4 ± 0,14	20	Wöppelmann (1997)	1,6 ± 0,3

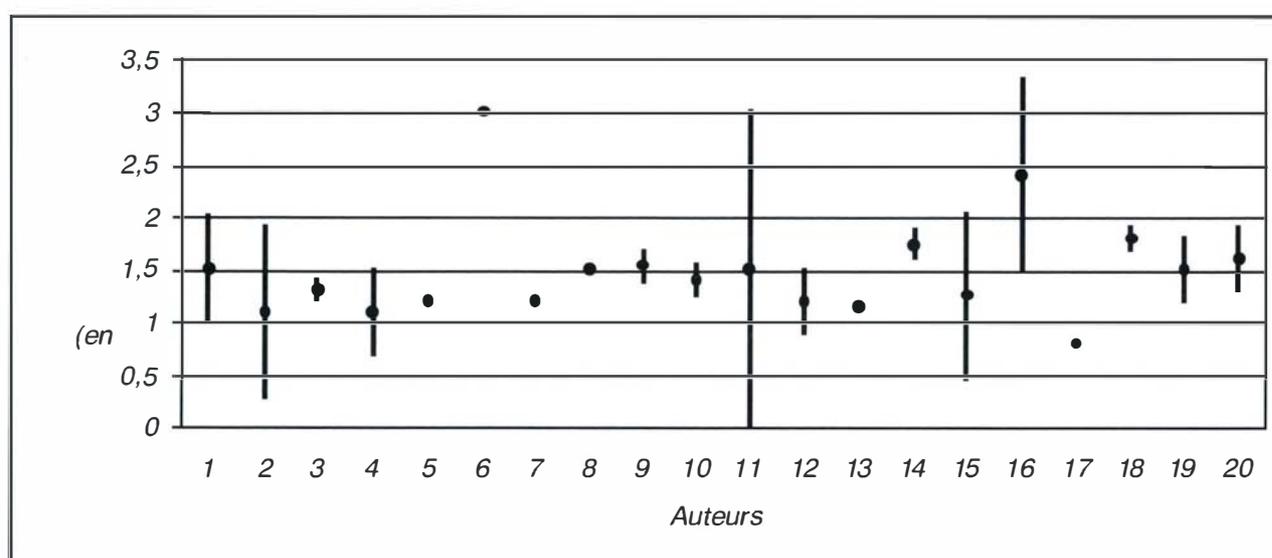


figure B.9.3

L'ensemble des auteurs s'accordent sur une élévation récente du niveau marin qui, selon les études effectuées ces dix dernières années, se situe entre 0,8 et 2,4 mm/an, pour des observations remontant parfois à la fin du XVIIIe siècle. Le nombre de publications donne une idée de l'importance du problème d'estimer cette grandeur, mais aussi de la difficulté de l'entreprise. Il est d'ailleurs quelque peu décourageant de s'apercevoir que la valeur n'est pas mieux cernée soixante ans après Vignal [1935].

L'analyse des données marégraphiques soulève un certain nombre de difficultés lorsqu'on cherche à estimer la tendance séculaire. D'une part, les données marégraphiques présentent des couvertures temporelle et spatiale peu homogènes. Des séries temporelles de plus de quarante années sont souvent nécessaires pour filtrer les signaux océaniques décennaux et interdécennaux, et établir des tendances du niveau de la mer précises à mieux que 0,5 mm/an. Or, la plupart des observatoires satisfaisant cette contrainte se trouvent dans les côtes de l'hémisphère nord, plus spécifiquement dans celles des pays d'Amérique du Nord, d'Europe et du Japon.

D'autre part, les tendances indiquées par les marégraphes varient beaucoup d'un observatoire à l'autre. La variabilité apparaît non seulement à l'échelle mondiale, mais aussi aux échelles régionale et locale. Il est donc difficile de dégager une tendance générale du niveau de la mer à partir de ces données. Les résultats obtenus sur divers ensembles de marégraphes varient d'ailleurs autant d'une étude à l'autre que la valeur moyenne qu'elles fournissent. L'explication de cette incertitude se trouve dans la nature même de la mesure du marégraphe: locale et liée à la terre sur laquelle repose l'instrument. Aussi, les mouvements verticaux du support du marégraphe ressortent dans les enregistrements tout autant que les fluctuations océaniques. Bien qu'ils soient souvent négligeables à court terme, les soulèvements ou les affaissements de l'écorce terrestre d'origine volcanique, tectonique, isostatique, ou anthropique, apparaissent comme des facteurs régionaux et locaux, dont la signature à long terme dans l'enregistrement marégraphique est au moins aussi importante que celle des facteurs de changement de volume d'eau dans l'océan.

L'étude de Vignal [1935] portait sur un grand nombre de mesures effectuées en Méditerranée. L'auteur estimait une tendance légère du niveau moyen à s'élever à une vitesse de l'ordre du millimètre par an, dépassant rarement deux millimètres par an. Il constatait que cette élévation variait très sensiblement et irrégulièrement d'un port à l'autre, remarquant parfois l'abaissement dans certains ports. En outre, il appréhendait déjà correctement la nature du signal délivré par les marégraphes, ainsi que les incertitudes subséquentes : "... *quand bien même certains appareils marémétriques dénoteraient un mouvement ascensionnel non périodique incontestable du niveau moyen de la mer, cette ascension pourrait tenir, non à une véritable montée des eaux par rapport au socle continental, mais simplement à un affaissement très localisé d'une étroite bande côtière*".

Ces difficultés ont conduit des scientifiques à ne retenir qu'un nombre critique de marégraphes pour estimer la variation séculaire du niveau des mers sur ce dernier siècle. Certains ont résolu le problème des mouvements épirogéniques en étudiant les indices géologiques disponibles à proximité des marégraphes, et en écartant alors les observatoires qui n'étaient pas sur une côte définie comme "stable". De fait, ils ont renoncé à des sites géographiques qui attestent de mouvements épirogéniques passés. Les mouvements verticaux contemporains sont parfois repérés lorsque l'évolution à long terme de l'enregistrement est suspecte, notamment lorsque la tendance s'écarte notablement de la valeur préjugée, située entre 1 et 2,5 mm/an. Les dérives instrumentales sont de manière générale traitées de la même manière.

D'autres chercheurs ont corrigé les tendances des marégraphes à l'aide des vitesses verticales obtenues des modèles géophysiques et géologiques actuellement disponibles. A cet égard, seul l'effet de rebond postglaciaire est effectivement pris en compte. Les résultats fournis par ces modèles sont relativement fiables, mais quelques études récentes montrent que les valeurs des vitesses estimées sont encore trop sensibles à quelques paramètres du modèle de terre, à savoir, l'épaisseur de la lithosphère et la viscosité du manteau. Un historique de déglaciation fidèle à la réalité est par ailleurs de prime importance.

L'analyse critique des études publiées jusqu'ici montre qu'il n'y a pas une unique façon d'apprécier le changement global du niveau de la mer à partir des enregistrements marégraphiques, ni même d'estimer une tendance moyenne se rapportant aux jeux de données disponibles. Les valeurs obtenues sont relativement proches. Leurs écarts ne reflètent pas tant les différents choix à la base de l'analyse (marégraphes sélectionnés, durée et période des séries temporelles, combinaisons régionales, modèle physique et techniques statistiques de traitement) que la difficulté d'extraire un signal ténu, encore mal appréhendé, à partir de données ambiguës renfermant vraisemblablement d'autres signaux, de caractéristiques voisines du signal recherché. Aussi, la solution ne pourra provenir de nouveaux traitements des données marégraphiques seules, aussi sophistiqués soient-ils.

Une information complémentaire externe semble indispensable. Tant qu'une référence "absolue" ne sera pas disponible pour surveiller les déformations de l'écorce terrestre, les déterminations resteront incertaines.

Systemes de référence

Faute d'une référence altimétrique stable de façon "absolue", toute tentative de détermination précise des variations eustatiques à partir des enregistrements marégraphiques semble incertaine. Le caractère absolu est cependant un concept idéal, inaccessible *a priori*. Les éléments que l'on souhaite a priori voir allouer du caractère absolu sont la stabilité du système et son étendue. On recherche en effet un référentiel universel, de façon à permettre l'accès à celui-ci en tout marégraphe côtier du globe, et une stabilité totale, de sorte que tout déplacement d'un repère de marée puisse être déterminé sans ambiguïté.

En pratique, on se définit un degré d'imperfection du caractère absolu au dessous duquel le système est considéré comme tel. La définition s'effectue en relation avec l'application visée. Dans notre cas, un niveau d'instabilité acceptable du référentiel serait d'au plus 10% de l'amplitude des signaux à long terme que l'on cherche à déterminer, soit quelques dixièmes de millimètres par an.

Après un panorama des références verticales accessibles à proximité des marégraphes, nous nous sommes consacrés à étudier la qualité du système de référence terrestre établi par l'IERS. Les résultats sont encourageants, mais ils s'avèrent souvent insuffisants dans le cadre de notre problème. D'une précision de l'ordre de plusieurs centimètres pour l'ITRF89, elle est d'ordinaire du centimètre aujourd'hui. Mais, force est de constater que la composante verticale est la moins bien déterminée, d'un facteur deux environ par rapport à la composante horizontale. La précision des vitesses verticales de l'ITRF94 paraît, en termes d'écart-type, inférieure à 2 mm/an dans presque 40% des cas (cf. figure B.9.4).

L'indicateur de précision relative fourni par le coefficient de variation montre que les vitesses sont souvent peu significatives. En effet, dans au moins 65% des cas, nous ne sommes pas en mesure de discriminer si le point fait l'objet d'un affaissement, ou d'un soulèvement, avec un niveau de confiance statistique d'au moins 75%. Il est toutefois possible que les points soient effectivement stables, auquel cas cet indicateur relatif de qualité paraîtra toujours trop fort, ceci quelque soit la précision absolue de l'estimation.

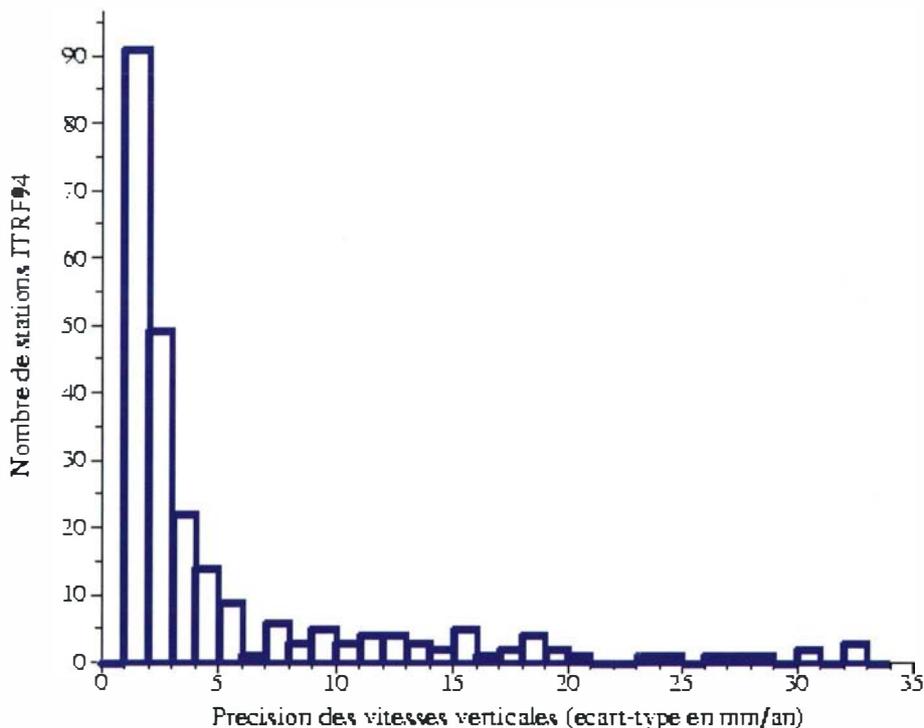


figure B.9.4
Niveau de précision de l'estimation de la vitesse verticale des points de la solution ITRF94. Histogramme établi suivant les écart-types issus du calcul

La principale conclusion de l'étude de la solution préliminaire de l'ITRF96 est que, de toute évidence, le développement considérable des recherches dans le domaine de la géodésie spatiale rend certaines conclusions provisoires et rapidement périmées. Alors qu'aucune vitesse n'était estimée à mieux que le millimètre par an dans l'ITRF94, 21% des sites présentent une vitesse verticale à mieux que cette précision dans la nouvelle solution, et 10% à mieux que 0,5 mm/an (cf. figure B.9.5).

Par ailleurs, dans au moins 35% des sites de l'ITRF96, nous sommes en mesure de dire si le point subit un mouvement d'affaissement ou de soulèvement avec un niveau de confiance statistique d'au moins 75%.

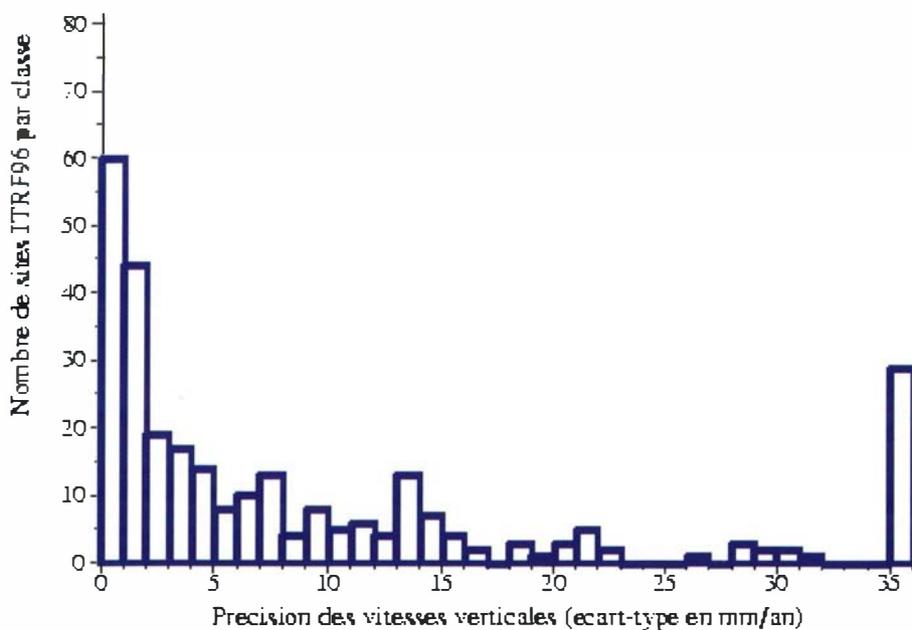


figure B.9.5
Niveau de précision de l'estimation de la vitesse verticale des sites de la solution préliminaire de l'ITRF96. Histogramme établi suivant les écart-types issus du calcul

Les deux graphiques précédents traduisent une amélioration générale de la qualité des résultats. Elle apparaît aussi bien dans l'estimation des composantes du positionnement que dans les indicateurs de qualité fondés sur l'étude des résidus [SILLARD 97]. Nous encourageons le lecteur intéressé de se rapporter à cette présentation ou à la publication prochaine des résultats de la solution définitive de l'ITRF96 (cf. l'article B.7 de Z. Altamimi et al).

Selon [SILLARD 97], l'ITRF96 présente une amélioration significative en matière d'exactitude et de précision sur la détermination des coordonnées qui serait de l'ordre de 0,5 cm par rapport à l'ITRF94. Les progrès sensibles qui sont observés en trois ans dans la réalisation du système terrestre s'expliquent par :

- d'une part, la qualité des données fournies en entrée du processus de combinaison, à savoir les solutions individuelles fournies par les divers centres d'analyse associés à l'IERS et issues du traitement des mesures de géodésie spatiale,

d'autre part, la mise en œuvre de nouveaux modèles développés dans le processus de combinaison lui-même, à savoir, le modèle physique qui intègre de manière cohérente les coordonnées et les vitesses de stations terrestres et le modèle stochastique qui désormais prend en compte les matrices de covariance complètes des jeux fournis. La calibration des variances de chaque jeu s'effectue en faisant correspondre ces variances à la distribution observée lors de l'ajustement : l'estimation des composantes de la variance s'effectue par une méthode dite de Helmert.

Outre les explications évoquées ci-dessus, nous devons noter que les mesures précises sont récentes, et par conséquent trop brèves pour fournir des résultats clairs et significatifs. Il est donc encore difficile de les interpréter comme des mouvements réels de l'écorce terrestre. C'est ainsi que la technique spatiale de positionnement DORIS, récemment introduite dans le calcul de l'ITRF, donne en général des estimations moins fiables. Trois ans séparent l'ITRF94 de l'ITRF96, et le cumul des observations permet déjà un gain considérable de précision dans l'estimation des vitesses verticales. Notons à cet égard que les histogrammes des figures B.9.4 et B.9.5 suggèrent un transfert de la précision des points des classes 1-2 mm/an et 2-3 mm/an vers la gauche alors que les nouveaux sites apparaissent dans les classes mal déterminées à droite du graphique, notamment la classe de plus de 35 mm/an. Il s'agit à présent de faire les efforts nécessaires pour généraliser ce niveau de précision de quelques dixièmes de millimètres par an vers les points qui intéressent les chercheurs concernés par l'étude de l'évolution du niveau de la mer à partir des marégraphes.

Synergie de la marégraphie et de la géodésie spatiale

Principe

L'expectative d'exprimer les mesures des marégraphes dans un système de référence terrestre tel que l'ITRS a soulevé l'intérêt de la communauté scientifique, et en particulier des chercheurs dont les résultats sont limités par le caractère local et relatif de ces mesures. Aussi, la combinaison des techniques de marégraphie et de géodésie spatiale apparaît comme une solution attractive à explorer. Elle permettrait de comparer avec précision les résultats des marégraphes à l'échelle mondiale, et d'estimer sans ambiguïté les variations absolues du niveau de la mer liées aux changements climatiques.

Le concept de rattacher les marégraphes à un système géodésique n'est pas nouveau. Il remonte au moins au début du siècle, alors qu'on cherchait déjà à comparer les niveaux marins des côtes méditerranéenne et atlantique obtenus à partir des marégraphes métropolitains en France [Vignal 1935]. Toutefois, notre étude montre quels sont les risques à utiliser les réseaux de nivellement comme référence verticale pour effectuer de telles comparaisons [WÖPPELMANN 97]. L'originalité du processus synergique que nous étudions ici réside dans la référence verticale considérée, de nature géométrique et géocentrique, et dans les techniques de géodésie spatiale qui permettent de la réaliser, et de s'y rattacher. La relation entre les données du marégraphe et la réalisation du système de référence terrestre est déterminée par les diverses techniques qui constituent ce processus. Chacune constitue un maillon de la chaîne qui relie de proche en proche le niveau de la mer et le système géodésique.

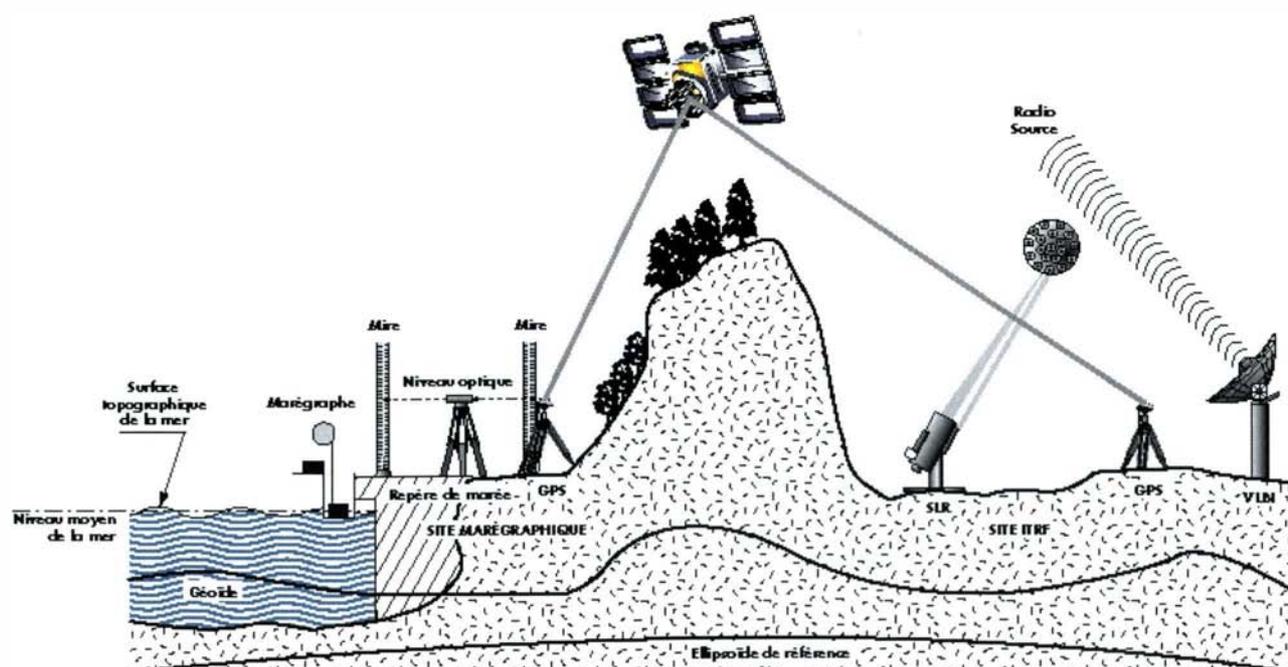


figure B.9.5 : principaux constituants du rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence terrestre mondial par techniques de géodésie spatiale (dessin A. Pasquier)

La figure B.9.5 illustre les principaux éléments du processus de rattachement géodésique des marégraphes considéré. D'un côté, nous avons le niveau de la mer et la marégraphie, de l'autre, la matérialisation du référentiel terrestre et la géodésie spatiale. La liaison entre les deux se fait dans le cas général par nivellement et par techniques spatiales différentielles portables.

La relation qui apparaît de prime abord s'écrit en considérant la contribution de chacune des techniques :

$$h_m = m + \Delta H_{MG} + h_G$$

avec :	h_m	hauteur ellipsoïdale du niveau de la mer,
	m	donnée du marégraphe,
	ΔH_{MG}	dénivelée entre le repère de marée (M) et le repère géodésique (G),
	h_G	hauteur ellipsoïdale du repère géodésique (G).

Cette formulation générale, souvent mentionnée dans la littérature, est toutefois approchée. Elle pourrait suffire dans la plupart des cas, mais elle ne reflète pas quelques réalités qui peuvent en pratique poser des difficultés à obtenir des résultats, ou qui permettent d'expliquer la qualité médiocre de ces derniers, à titre d'exemple :

- le transfert de hauteur par nivellement se réalise de fait par rapport à une surface de niveau, que l'on peut d'ailleurs assimiler au géoïde. Or, celle-ci présente parfois une pente non négligeable par rapport à l'ellipsoïde de référence. D'autant plus négligeable, il est vrai, que le relief est plat et le cheminement court,
- la donnée du marégraphe est rarement diffusée par rapport au repère de marée. Des confusions peuvent survenir lorsque les intervenants d'origines différentes ne s'entendent pas clairement sur les questions terminologiques de référence du marégraphe : référence interne de l'instrument, ou référence externe de l'observatoire définie par le biais du repère de marée, mais pas forcément confondue avec son sommet.

Aussi, une formulation plus complète est donnée dans le mémoire de thèse [WÖPPELMANN 97]. Chacune des grandeurs définies dans cette nouvelle relation peut être considérée a priori comme indépendante des autres. Les valeurs respectives sont en effet issues de techniques d'observation et d'analyse différentes. Par suite, les erreurs systématiques intrinsèques à chacune d'elles pourront également être estimées de manière indépendante dans un budget d'erreur. Un inventaire aussi exhaustif que possible des sources d'erreur systématique est d'ailleurs dressé pour chaque "maillon" de la chaîne du processus dans le mémoire de thèse.

Approche pratique

Différents types de rattachement peuvent être distingués suivant le type de résultat escompté, à savoir :

- une position singulière. Les coordonnées du point ne sont déterminées qu'une fois. Une seule campagne d'observation suffit *a priori*. En revanche, si le point était déplacé artificiellement ou naturellement d'une quantité jugée inacceptable, il est nécessaire de recommencer. Des vérifications peuvent aussi susciter une ré-observation ultérieure,
- une série temporelle de positions. Dans ce cas, des campagnes répétées dans le temps doivent être planifiées à plus ou moins long terme, et à intervalles réguliers,
- un enregistrement continu. Nous avons dans ce cas un système permanent couplé d'un marégraphe et d'un récepteur de géodésie spatiale. Ce système synergique permet d'envisager des séries temporelles comportant un échantillonnage temporel élevé, qui n'était pas compatible avec l'organisation de campagnes : positions mensuelles ou hebdomadaires, par exemple.

L'intérêt d'avoir des mesures répétées n'est pas de confirmer la qualité des résultats, ou de l'améliorer en espérant réduire les erreurs aléatoires, mais surtout, parce que les grandeurs définies dans la relation générale sont a priori fonction du temps, des spectres de variation assez différents qui permettent de faire des hypothèses et des simplifications. La qualité du processus de rattachement dépend des erreurs systématiques propres à chaque "maillon" du processus, de la prise en compte correcte des déplacements et des dérives associés aux grandeurs considérées. A cet égard, nous allons voir dans le prochain chapitre quelles sont les sources d'erreur systématique.

Notons également que le traitement des observations d'une technique spatiale s'effectue en général par réseau de points, donnant lieu à un jeu de coordonnées associé. Ceci même si la technique n'est pas de type différentielle, afin de mieux contraindre les incertitudes liées au système de référence terrestre sous-jacent à la solution individuelle. Diverses stratégies de calcul en réseau sont possibles. Une stratégie en "réseau d'appui" contraint fortement les coordonnées d'un certain nombre de points, ou les fixe. Les coordonnées de ces points définissent alors le système de référence de la solution. L'inconvénient principal de cette méthode est que les incertitudes dans les positions des points fortement contraints se répercutent dans les estimations des coordonnées des autres points. Une autre stratégie est celle de "réseau libre", ou plus précisément à contraintes minimales. Les résultats d'une telle solution sont plus cohérents, dans la mesure où les données s'ajustent à un système de référence naturel, intrinsèque au processus

d'analyse et aux observations. Ce n'est que par la suite que l'on retranche le biais de système de référence en combinant la solution obtenue en réseau libre avec la réalisation du système de référence terrestre auquel on désire se ramener.

La mise en œuvre d'une stratégie d'observation et de calcul particulière, plutôt qu'une autre, dépend toutefois de l'application visée, de la dimension du réseau de points, des moyens disponibles pour la mener à bien, et des résultats attendus. Les questions stratégiques sont toujours d'actualité. Elles sont discutées en particulier dans le groupe de travail de la Commission Niveau Moyen de la Mer et Marées (CMSLT) de l'AIPO [CARTER et al 89 et 94]. Ce groupe réunit les acteurs intéressés par les résultats du processus de rattachement géodésique des marégraphes : océanographes, géodésiens et représentants des services internationaux de l'IERS et du PSMSL, et plus récemment du Service international du système GPS pour la géodynamique (IGS).

L'évolution des techniques spatiales influe bien entendu sur l'approche du problème. Les deux rapports successifs du groupe de travail de la CMSLT reflètent en particulier les progrès considérables réalisés en quelques années par le GPS, [CARTER et al 89] distingue les techniques de base, à savoir la télémétrie laser et le VLBI, plutôt lourdes, des techniques radioélectriques, en l'occurrence GPS, DORIS, PRARE, beaucoup plus portables. Les premières affichent une précision de quelques centimètres, qui légitime leur participation à l'établissement du système de référence mondial de l'IERS. Les deuxièmes donnent une précision relative de l'ordre de 10^{-6} , autrement dit, sur une ligne de base de 100 km l'estimation de sa longueur est donnée à un centimètre près. Elles permettent toutefois de conserver la qualité des points de l'ITRF en l'étendant à des points situés à quelques centaines de kilomètres.

En quelques années, cette précision a progressé de manière spectaculaire pour les techniques radioélectriques légères, D'une précision relative de 10^{-6} en 1988, elle est passée à 10^{-8} pour le GPS, en 1991, et se transforme en suivant en précision absolue centimétrique [HEFLIN et al 92]. Le GPS est ainsi adopté par l'IERS en 1991, suivi par DORIS en 1994. Le deuxième rapport du groupe de travail de la CMSLT considère ces performances, et envisage sérieusement le concept de stations permanentes équipées de marégraphe et de récepteur de géodésie spatiale [CARTER et al 94].

De nouvelles questions se posent aussi :

- Comment va-t-on intégrer les réseaux régionaux dans l'ITRF ?
- Doit-on accepter les solutions régionales comme des solutions globales ?
- A-t-on les moyens techniques de le faire ?
- A-t-on la volonté politique ?
- Comment profiter des nouveaux systèmes d'analyse qui prennent en compte les matrices de covariance complètes ?
- Quelle rôle peut jouer l'IGS ?

Toutes ces questions et bien d'autres sont à l'étude par les groupes d'experts internationaux.

Le marégraphe de Marseille

Après une longue gestion commune avec le Service des Phares et Balises, le marégraphe de Marseille (Anse Calvo) est désormais sous la seule responsabilité de l'IGN. La série temporelle de données fournie par ce marégraphe est l'une des plus longues dans le monde. De ce fait, le marégraphe de Marseille a attiré l'attention de nombreux chercheurs qui s'intéressent à l'étude des variations à long terme du niveau des mers. Il constitue un des éléments du système de surveillance mondial du niveau des mers, défini en 1985 par la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO et connu sous le nom de GLOSS. Mais, le marégraphe de Marseille est également inclus dans de nombreux autres projets d'échelle plus régionale et européenne, tels que EOSS, EUVN, SELF.

Au cours du travail de thèse, nous avons examiné les données de ce marégraphe centenaire. Nous avons relancé des opérations d'étalonnage pour contrôler son fonctionnement et recalibrer son zéro instrumental. Ces opérations reposent sur la comparaison des mesures simultanées du marégraphe et d'un dispositif sondeur, considéré comme étalon. La mise en œuvre du test de Van de Casteele permet de déceler certaines imperfections de fonctionnement du marégraphe, et de s'assurer de la constance des indications [VAN DE CASTEELE 62].

Le test s'appuie sur un diagramme dans lequel les écarts marégraphe-étalon sont portés en abscisses, et la hauteur d'eau correspondante en ordonnées. Un marégraphe parfait donne une courbe réduite à une droite parallèle à l'axe des ordonnées. D'ordinaire, les points se répartissent sur deux branches verticales. L'une correspond aux mesures effectuées en marée montante, et l'autre aux mesures effectuées en marée descendante. En ajoutant les points obtenus pendant les marées étales, la courbe complète forme ce que l'on appelle un cycle d'hystérésis. L'écart entre les deux branches verticales témoigne des jeux ou des retards du marégraphe.

Les diagrammes de van de Casteele ne sont pas toujours aisés à interpréter dans le cas de Marseille. Celui de la figure B.9.6 correspond au dernier étalonnage que nous avons effectué en décembre 1996. Une nouvelle imperfection

semble affecter le fonctionnement de l'appareil, il s'agit du défaut d'échelle. Celui-ci n'est pas clairement apparent sur les diagrammes passés.

Le défaut d'échelle est dû à une mauvaise transmission de l'information captée par le flotteur. Dans les marégraphes à flotteur, il correspond à un rapport variable entre le déplacement du style inscripteur et celui du flotteur. De nombreux éléments peuvent produire cette imperfection, par exemple, le rapport d'engrenage, une variation du rayon du tambour d'enroulement du câble, le chevauchement des spires sur le cylindre, le diamètre du fil, etc. Dans le cas présent, le défaut d'échelle ne semble toucher que la plage de mesure qui est située au delà de vingt-quatre centimètres au dessus du zéro NGF-IGN69. L'effet sur les données moyennes du niveau de la mer est de nature systématique, car la valeur de $\{h\}$ varie sur une portion donnée en fonction de la hauteur d'eau considérée.

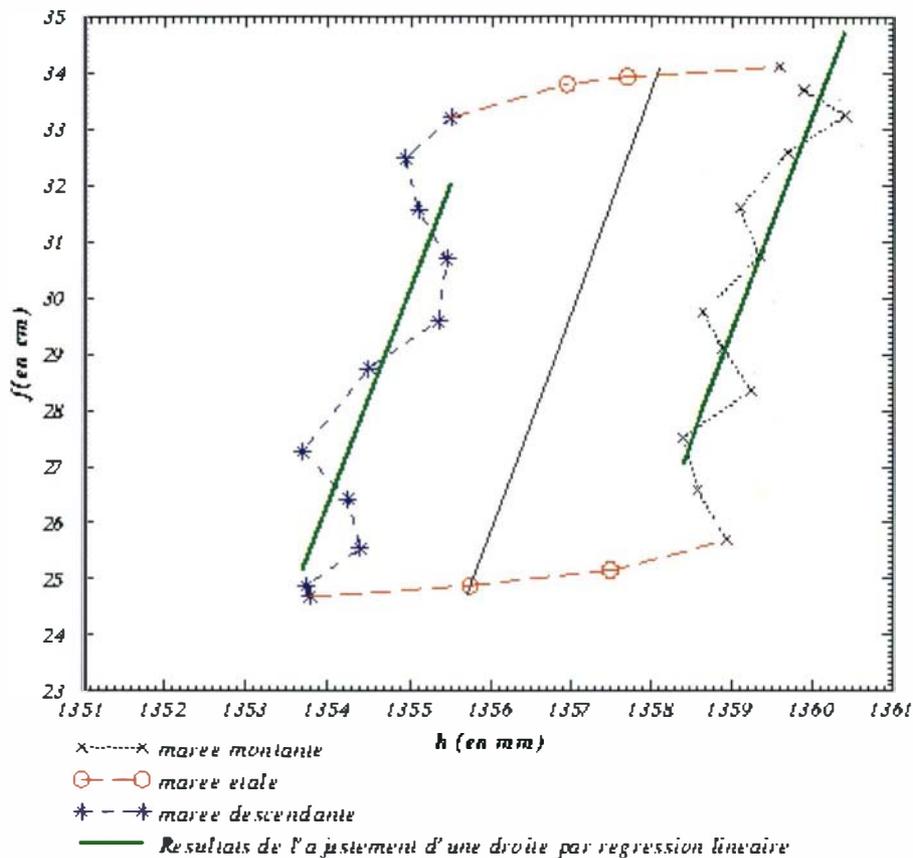


figure B.9.6 :
Mise en évidence d'un défaut d'échelle du marégraphe de Marseille à l'aide du test de Van de Castele appliqué aux données de l'étalonnage de décembre 1996, (f représente la hauteur d'eau dans le puits et h la constante de calage associée)

La compilation des étalonnages passés montre que les calages réguliers de la référence instrumentale sont indispensables pour se prémunir d'une dérive qui ne peut être négligée lorsque l'on s'intéresse à des signaux aussi ténus que les variations eustatiques. Le tableau B.9.7 montre quelle aurait été la dérive de la référence interne du marégraphe de Marseille si les résultats des étalonnages n'avaient pas été pris en compte.

tableau B.9.7 : dérive de la référence interne du marégraphe de Marseille estimée par régression linéaire sur les résultats des opérations de calage qui sont disponibles

Période	Dérive de l'instrument estimée par régression linéaire en mm/an
1909 - 1996	$0,73 \pm 0,10$
1941 - 1996	$0,34 \pm 0,07$
1962 - 1996	$0,47 \pm 0,07$
1941 - 1985	$0,05 \pm 0,06$

La valeur de la dérive interne du marégraphe de Marseille peut donc atteindre un ordre de grandeur comparable à la tendance du niveau de la mer qui est estimée à partir des marégraphes (de l'ordre du mm/an). Il est donc important de la surveiller par des étalonnages réguliers, et de corriger en conséquence les enregistrements du niveau de la mer qui sont destinés à l'étude des variations eustatiques du niveau de la mer.

De l'examen des données des étalonnages, il ressort que le marégraphe de Marseille est un instrument de grande précision. Il est d'autant plus remarquable qu'il s'agit d'un appareil qui fonctionne depuis plus d'un siècle, mais qui accuse de ce fait des imperfections inhérentes à l'action du temps, propres aux systèmes mécaniques.

Un effort important serait toutefois nécessaire pour remédier aux imperfections détectées, d'éviter que les erreurs ne s'amplifient davantage. La notion de précision est relative et le besoin de l'application de surveillance du niveau des mers est très exigeante sur cet aspect. En particulier, la fidélité de l'appareil exclut tout phénomène d'hystérésis, toute plage d'incertitude, et sa justesse toute erreur systématique.

Son fonctionnement ne répond pas aujourd'hui aux spécifications internationales en vigueur [IOC 90]. Les scientifiques ont besoin de connaître tout le spectre temporel des variations du niveau de la mer. Or, depuis juillet 1987, le marégraphe de Marseille ne trace plus les courbes de marée, De plus, les marégrammes passés ne sont pas exploitables sans une numérisation préalable, longue et fastidieuse, que l'IGN a toutefois démarré récemment sous l'impulsion du Ministère de l'Environnement, avec l'aide du SHOM.

Par ailleurs, son entretien est délicat, d'autant qu'il repose sur des aspects de mécanique de haute précision qui demandent une maintenance d'un niveau technique que l'IGN n'est plus certain de pouvoir assurer de manière correcte et rapide. Les contrôles de qualité et de performance sont nombreux et ne devraient pas se limiter au simple étalonnage. En toute rigueur, chaque composante de l'appareil nécessite une vérification soignée, et une correction adaptée. Parmi les éléments à surveiller, citons par exemple : l'usure des roulettes du totalisateur; leur roulement sur le disque horaire sans glissements parasites variables; la réduction mécanique d'échelle; le parallélisme des axes des roulettes totalisatrices et de la direction du mouvement du chariot porte-roulettes; l'usure et l'inextensibilité des fils porteurs; l'étanchéité absolue et permanente du flotteur.

Conclusion et perspectives

Le concept de rattachement des marégraphes dans un système de référence mondial est relativement simple en théorie, mais en pratique il est assez difficile d'obtenir des résultats de précision élevée. Les raisons ne manquent pas pour expliquer ce constat : incertitudes méthodologiques, problèmes logistiques, multiplicité des intervenants, etc. Diverses techniques de mesure interviennent dans le processus qui permet d'obtenir un niveau de la mer absolu. Au sein de chaque technique les sources d'erreur systématique sont nombreuses et variées. Une négligence ou un manque d'attention sur l'une des grandeurs intermédiaires du processus synergique affecte irrémédiablement les résultats au bout de la chaîne.

Il est donc important que des experts en chaque domaine du processus interviennent. Toutefois, il est aussi important qu'un cadre de coopération soit bien défini, en particulier qu'il assure les échanges d'information. Autrement, on se heurte à un travail délicat et pénible de collecte des données éparses et hétérogènes, relatives à chaque étape de la chaîne de mesure, qui demande de la part du "collecteur" un effort non négligeable de compréhension et de traduction. Cet effort permet de construire des résultats cohérents et d'avoir une idée précise de leur qualité.

C'est sur ce constat que l'IGN et le SHOM unissent leurs efforts aujourd'hui pour développer le projet SONEL, Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales [WÖPELMANN et al 96]. L'élément central de SONEL est une base de données mixte de produits issus de la marégraphie et de la géodésie spatiale qui palliera aux difficultés évoqués ci-dessus. Le système prévoit de collecter les données de chacun des maillons du processus de rattachement des marégraphes par techniques spatiales. Il offrira d'une part des données de niveau moyen de la mer exprimées dans une référence géodésique mondiale et, d'autre part, la meilleure estimation possible du mouvement vertical de chaque repère de marée.

Le point fort de SONEL réside dans la participation active et coordonnée des différents acteurs, aussi bien des organismes producteurs des divers types de données, qui peuvent garantir le suivi et l'analyse de ces données, que des utilisateurs qui donneront leur avis sur l'intérêt scientifique de tel ou tel site. Tant qu'un tel système intégré n'existera pas de manière opérationnelle, aux niveaux national et international, l'obtention de résultats de qualité restera incertaine.

Au regard des lacunes et difficultés évoquées dans cet article, et suivant les recommandations du CNFGG, l'IGN entreprend, toujours avec la coopération du SHOM, l'installation d'un marégraphe moderne, numérique, en remplacement de marégraphe centenaire de Marseille. Signalons également que l'IGN prévoit le suivi géodésique continu des mouvements verticaux des marégraphes de Brest et de Marseille, en y installant des récepteurs GPS permanents dans le courant du premier semestre 1998.

Enfin, outre l'apport à la connaissance des phénomènes géophysiques inclus dans le signal séculaire du marégraphe, d'autres applications sont intéressées par la synergie entre les techniques de la géodésie spatiale et de la marégraphie. Nous en mentionnons deux dans le mémoire. La première concerne l'unification des systèmes d'altitude. Nous avons vu que les surfaces de référence des systèmes d'altitude nationaux sont *a priori* cohérentes au niveau du mètre en raison de l'origine de chacune, fixée au niveau moyen de la mer en un point de la côte. Mais elles sont plus ou moins directement liées entre elles par différents types d'informations.

La deuxième application concerne le calage du biais de l'altimètre radar embarqué satellite, mais aussi l'évaluation de sa dérive de basse fréquence. En rattachant les marégraphes dans le même système de référence terrestre que celui de l'orbite du satellite, nous disposons de mesures indépendantes de la même grandeur physique. Leur confrontation permet alors d'évaluer l'ensemble du système altimétrique : erreurs instrumentales, mais aussi erreurs issues des corrections qui sont appliquées aux données du satellite.

Sigles

AIPSO	Association Internationale des Sciences Physiques de l'Océan.
CNFGG	Comité National Français de Géodésie et de Géophysique.
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique.
DORIS	Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite.
EOSS	European Sea-Level Observing System.
EUVN	EUropean Vertical Network.
GLOSS	Global Sea Level Observing System.
GPS	Global Positioning System;
IERS	International Earth Rotation Service.
IGS	International GPS Service for Geodynamics.
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
ITRF	International Terrestrial Reference Frame.
ITRS	International Terrestrial Reference System.
LAREG	LABoratoire de Recherches en Géodésie.
NGF	Nivellement Général de la France.
PRARE	Precise Range And Range-rate Equipment.
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level.
SELF	Sea Level Fluctuations in the Mediterranean.
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
SONEL	Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales.
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
VLBI	Very Long Baseline Interferometry.

Références

- [BARNETT 84] T.P. Barnett : *The estimation of "global" sea level change: a problem of uniqueness*, in Journal of Geophysical Research, Vol. 89, Nr, C5, pp. 7980-7988, 1984.
- [BLANCHON 95] P. Blanchon : *Catastrophic sea-level rise and reef drowning 7,6 ka ago : an omen? NASA/NOAA/NSF, Workshop on Global Sea-Level Change*, November 15-17, 1995, RSMAS, University of Miami, Florida, 1995.
- [CARTER ed 94] W.E. Carter (ed.) : *Report of the Surrey Workshop of the IAPSO Tide Gauge Bench Mark Fixing Committee*, December 13-15, 1993, Institute of Oceanographic Sciences Deacon Laboratory, Wormley (UK), NOAA Technical Report NOSOES0006, 1994.
- [CARTER et al 89] W.E. Carter, D.G. Aubrey, T.F. Baker, C. Boucher, C. Le Provost, D.T. Pugh, W.R. Peltier, M. Zumberge, R.H. Rapp, R.E. Schutz, K.O. Emery & D.B. Enfield : *Geodetic fixing of tide gauge bench marks*, Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report, WHOI-89-31, CRC-89-5, 44 p, 1989.
- [DOUGLAS 91] B.C. Douglas : *Global sea level rise*, Journal of Geophysical Research, vol. 96, C4, pp. 6981-6992, 1991.
- [EKMAN 92] M. Ekman : *Postglacial rebound and sea level phenomena, with special reference to Fennoscandia and the Baltic Sea*, Geodesy and Geophysics n° 115, Lecture notes, NKG Autumn school in Helsinki (SF), September 7-13, pp. 7-70, 1992.
- [GORNITZ et al 82] V. Gornitz, S. Lebedeff & J. Hansen : *Global sea level trend in the past century*, Science, vol. 215, pp. 1611-1614, 1982.
- [GUTENBERG 41] : *Changes in sea level, postglacial uplift, and mobility of the earth's interior*, Geological Society of America, in Bulletin, vol. 52, pp. 721-772, 1941.
- [HEFLIN 92] M. Heflin, W. Bertiger, G. Blewitt, A. Freedman, K. Hurst, S. Lichten, U. Lindqwister, Y. Vigue, F. Webb, T. Yunck & J. Zumberge : *Global geodesy using GPS without fiducial sites*, Jet Propulsion Laboratory, draft version, 1992.
- [IOC 85] Intergovernmental Oceanographic Commission : *Manual on sea-level measurement and interpretation : basic procedures*, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, IOC Manuals and Guides 14, vol. I, 83 p, 1981.
- [IOC 90] Intergovernmental Oceanographic Commission : *Global Sea Level Observing System (GLOSS) : implementation plan*, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Technical Series 35, 90 p, 1990.
- [IPCC 95] Intergovernmental Panel on Climate Change : *Climate Change 1995 : The Science of Climate Change*, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press 1996, 572 p, 1995.
- [LE PROVOST 93] C, Le Provost : *Les mécanismes des variations du niveau des mers*, Actes du séminaire "Élévation du niveau de la mer le long des côtes de France : mesures - impacts - réponses", Paris, 6-7 décembre 1993, publiés par le Ministère de l'Environnement, mai 1994, pp. 19-30, 1993.
- [LEVITUS 82] S. Levitus : *Climatological Atlas of the World Ocean*, NOAA Professional Paper n° 13, U.S. Government Printing Office, Washington DC (USA), 163 p, 1982.
- [LISITZIN 74] E. Lisitzin : *Sea level changes*, Elsevier Oceanography Series, 8, 286 p, 1974.

- [MITROVICA, DAVIS 95] J.X. Mitrovica & J.L. Davis : *Present-day post-glacial sea level change far from the Late Pleistocene ice sheets : Implications for recent analyses of tide gauge records*, in Geophysical Research Letters, vol. 22, n° 18, pp. 2529-2532, 1995.
- [PELTIER, TUSHINGHAM 91] W, R, Peltier et A, M, Tushingham : *Influence of glacial isostatic adjustment on tide gauge measurements of secular sea level change*, Journal of Geophysical Research, vol, 96, pp, 6779-6796, 1991,
- [PIRAZZOLI 76] P. Pirazzoli : *Les variations du niveau marin depuis 2000 ans*, Mémoire du Laboratoire de Géomorphologie de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, n° 30, 421 p, 1976.
- [PIRAZZOLI 96] P. Pirazzoli : *Sea-level Changes, The last 20 000 Years*, John Wiley & Sons, 211 pp, 1996.
- [PUGH 87] D. Pugh : *Tides, surges and mean sea-level*, John Wiley & Sons, 472 p, 1987.
- [SIMON 93] B. Simon : *La marégraphie*, Actes du séminaire "Élévation du niveau de la mer le long des côtes de France : mesures - impacts - réponses", Paris, 6-7 décembre 1993, publiés par le Ministère de l'Environnement, mai 1994, pp. 67-75, 1993.
- [TOLKATCHEV 96] A. Tolkatchev : *Global Sea Level Observing System (GLOSS)*, Marine Geodesy, vol. 19, Number 1, January-March 1996, pp. 21-62.
- [TRUPIN, WAHR 90] A. Trupin & J. Wahr : *Spectroscopic analysis of global tide gauge sea level data*, in Geophysical Journal International, vol. 100, pp. 441-453, 1990.
- [VAN DE CASTEELE 62] C. Van de Casteele : *Au sujet du contrôle du fonctionnement des marégraphes enregistreurs*, Communication sur l'activité de son Service (à l'IGN) présentée au cours de la Section d'Océanographie Physique du Comité National Français de Géodésie et Géophysique, le 26 Juin 1962.
- [VIGNAL 35] J. Vignal : *Les changements du niveau moyen des mers le long des côtes en Méditerranée et dans le monde*, Extrait des Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et Documents, numéro d'octobre, 52 p, 1935.

Publications

- [BOUCHER 97] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *The ITRF96 realization of the International Terrestrial Reference System*, Papier présenté à l'Assemblée Scientifique de l'Association Internationale de Géodésie, Rio de Janeiro, Brésil, septembre 1997.
- [BOUCHER et al 96] C. Boucher, Z. Altamimi, M. Feissel & P. Sillard : *Results and analysis of the ITRF94*, IERS Technical Note 20, Observatoire de Paris, 1996.
- [BOUCHER, WÖPPELMANN 94] C. Boucher & G. Wöppelmann : *Proposal for a European Primary Tide gauge Network*, présenté au "EUREF TWG Meeting", Francfort (D), 15-16 décembre 1994.
- [DUCHER 64] G. Ducher : *Les médimarémètres*, in Bulletin d'Information de l'Association des Ingénieurs Géographes n° 30, pp. 65-95, novembre 1964.
- [HURAUULT 55] L. Hurault : *Note sur l'utilisation des marégraphes pour la détermination du niveau moyen de la mer*, Institut Géographique National, réf. 2893 IGN/C, Paris, 15 juin 1955.
- [IGN 63] : *Le marégraphe fondamental*, Institut Géographique National, Notice Technique de la 2ème Division, Géodésie, Section de Nivellement de Précision, Edition provisoire, 8 p, avril 1963.
- [IGN] : *Le sondeur pour marégraphe*, Institut Géographique National, Note Technique de la 5ème Division, Section des Instruments de Mesure, Laboratoire de Géophysique, 10 pages.
- [LE PROVOST, WÖPPELMANN 94] C. Le Provost & G. Wöppelmann : *Rapport de mission Campagne NIVMER94, à bord du Marion Dufresne*, Rapport de mission des manipulations effectuées dans les sites de : Crozet-Kerguelen-Amsterdam-Saint Paul, OP 94/4-4, 65 p, octobre 1994.
- [SILLARD 97] P. Sillard : *L'ITRF96 : méthode de calcul et résultats*, Présentation à la Journée sur la détermination d'orbite précise, Toulouse, Publications du LAREG, Série Communication CM 45, 24 p, 17 novembre 1997.
- [WOODWORTH et al 97] P.L. Woodworth, T.F. Baker, G. Blewitt, C. Boucher & G. Wöppelmann : *A European Network for Sea Level and Coastal Land Level Monitoring*, in Journal of Marine Systems 13, pp. 163-171, 1997.
- [WÖPPELMANN et al 96] G. Wöppelmann, C. Boucher & L. Daniel : *Étude d'un Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL)*, rapport d'étude de l'Institut Géographique National, effectué dans le cadre du programme "Élévation du niveau de la mer" du Ministère de l'Environnement, Publications du LAREG, Série Rapport R 1, mai 1996.
- [WÖPPELMANN 97] G. Wöppelmann : *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale*, thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, soutenue le 23 juin 1997, devant le jury constitué de MM. François Barlier (Président), Georges Balmino (Rapporteur), Paolo Pirazzoli (Rapporteur), Christian Le Provost (Directeur de thèse), et Claude Boucher (Tuteur de thèse), 1997.

C. Bilan des actions de recherche

C.1

Image et photogrammétrie

Jean-Daniel Piquet-Pellorce (responsable du thème image et photogrammétrie)

C.1.1 Lecture automatique de cartes scannées

Marc Pierrot Deseilligny

Contexte

Une des difficultés majeures en analyse de photographies aériennes est le manque de compréhension globale de la scène. Or, ce modèle global existe sur les cartes qui, en raison de la normalisation des légendes, se prêtent mieux à une compréhension automatique.

L'étude porte essentiellement sur la lecture automatique de cartes IGN, scannées à partir des planches-mères (ce qui fournit un premier niveau de décomposition). Elle a démarré en octobre 1994.

Objectifs

Cette étude se situe dans le cadre de la saisie initiale de la base de données topographiques BD TOPO. Les objectifs en production sont :

- d'une part, de fournir des modèles globaux de la scène permettant de guider les algorithmes d'interprétation sur photographies aériennes,
- d'autre part, avec des coûts d'intervention opérateurs très faibles, des bases de données d'attente sur les zones qui ne seront couvertes qu'en fin de programmation BD TOPO (échéance 2015).

Suite

La thèse de Robert Mariani sur l'interprétation de la planche de bleu a été soutenue en octobre 1997. La thèse de Yannary Méhas-Yedid sur l'interprétation de la planche de vert, cofinancée par l'IGN, a été soutenue en février 1998.

La thèse de François Dupont, portant sur la création automatique de modèle numérique de terrain (MNT) par lecture des courbes de niveaux, a démarré en octobre 1996. Contrairement aux autres travaux de l'équipe, elle s'intéresse aussi bien aux cartes IGN numérisées à partir de planches-mères, qu'à la lecture de cartes étrangères numérisées en couleur à partir de la carte papier. Le sujet se recentre actuellement sur l'utilisation conjointe de la carte et d'un MNT issu soit de la restitution classique à petite échelle, soit de la corrélation automatique. Les erreurs obtenues par les deux procédés étant essentiellement indépendantes, on espère obtenir de la fusion des deux, un MNT de très bonne qualité.

Aujourd'hui, nous disposons d'un prototype à peu près complet sur les planches de noir et de bleu des cartes rédigées selon un des deux types de légendes utilisés pour les cartes au 1 : 25 000 (i.e. type 72). Une étude préalable, portant sur l'opportunité de mise en production des travaux effectués par l'équipe est actuellement menée par P-Y. Lecordix. Dans cette étude, les programmes sont testés sur deux cartes (zones de Cloyes et d'Amplepuis), différentes de celles utilisées lors de la phase de développement. Différents comptages ont d'ors et déjà été effectués et les taux de succès pour les principaux thèmes sont les suivants :

- écritures,
- réseau routier,
- hydrographie,
- bâti.

Du point de vue strictement technique, ces chiffres devraient être dans l'ensemble suffisants pour définir un processus de production.

Les actions futures envisagées sont :

- à court terme, l'extraction de quelques thèmes "secondaires" de la planche de noir non traités jusqu'à présent (église, serres, stades...),
- à moyen terme (éventuellement) le développement d'un prototype complet sur la planche de vert,
- à plus long terme, soit le portage des programmes au deuxième type de légendes utilisé pour les cartes au 1 : 25 000 (i.e. type 22) qui est sensiblement plus compliqué et moins normalisé que le type 72, soit le lancement d'une étude sur l'utilisation de planches cadastrales (interprétation complète ou vectorisation "soignée", ceci restant à définir) pour intégration dans les bases de données IGN.

Publications

[DESEILLIGNY et al 97a] M. Pierrot Deseilligny & R. Mariani : *A three year project on topographic maps interpretation*, Second IAPR Workshop on Graphics Recognition, p.160-167, laboratoire MATIS, IGN-SR 970012/C-COM, 1997.

[DESEILLIGNY et al 97b] M. Pierrot Deseilligny, F. Dupont & H. Le Men : *Automatic Interpretation of Contour Lines Out of Scanned Maps : An a priori Topological Knowledge Based Approach*, International Conference on Document Analysis and Recognition, p. 91, laboratoire MATIS, IGN-SR 970024/C-COM, 1997.

[DUPONT et al 97] F. Dupont, M. Pierrot Deseilligny & M. Gondran : *Automatic Interpretation of Scanned Maps : Reconstruction of Contour Lines*, Second IAPR Workshop on Graphics Recognition, p. 193-200, laboratoire MATIS, IGN-SR 970011/C-COM, 1997.

[MARIANI et al 97a1] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, J. Labiche & R. Mullot : *Linear Texture Segmentation Using Elastic Model Matching. Application to Geographic Maps Understanding*, Pattern Recognition, laboratoire MATIS, IGN-SR 970010/C-COM, 1997.

[MARIANI et al 97a2] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, J. Labiche & R. Mullot : *Linear Texture Segmentation using Elastic Model Matching. Application to Geographic Maps Understanding*, Second IAPR Workshop on Graphics Recognition, p. 201, laboratoire MATIS, IGN-SR 970010/C-COM, 1997.

[MARIANI et al 97b] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, J. Labiche & R. Mullot : *Algorithms for the hydrographic Network Names Association on Geographic Maps*, International Conference on Document Analysis and Recognition'97, p. 362, laboratoire MATIS, IGN-SR 970022/C-COM, 1997.

[MARIANI et al 98] R. Mariani, F. Lecourt, M. Pierrot Deseilligny, J. Labiche & Y. Lecourtier : *Interprétation de cartes géographiques : Algorithmes de reconstruction des réseaux hydrographiques et routiers*, Traitement du Signal, laboratoire MATIS, IGN-SR 980001/C-COM, 1998.

[MEAS YEDID 97] V. Meas Yedid, M. Pierrot Deseilligny & G. Stamon : *First level map interpretation contribution to vegetal representation*, Second IAPR Workshop on Graphics Recognition, p. 225, laboratoire MATIS, IGN-SR 970026/C-COM, 1997.

C.1.2 Conception et mise en œuvre d'algorithmes pour la restitution 3-D

Patrick Julien

Pour 1997, la recherche en "conception et mise en œuvre d'algorithmes pour la restitution 3-D" a porté sur deux aspects particuliers :

- corrélation d'images contrainte par modèle 3-D,
- qualités requises d'une modélisation numérique du relief à moyenne échelle.

Corrélation d'images contrainte par modèle 3-D (Patrick Julien)

La "corrélation d'images contrainte par modèle 3-D" se place dans le cadre de la restitution d'un couple (ou plus généralement d'un n-uplet) stéréoscopique d'images. Pour le moment, elle se propose de restituer des objets de forme géométrique simple : portions de terrain découvert ou maisons isolées. Elle repose sur le principe suivant : si on connaît le modèle 3-D exact de l'objet, alors les deux images de cet objet, extraites des deux photographies, et ortho-rectifiées à l'aide du modèle, sont identiques. En conséquence, restituer l'objet revient à trouver le modèle 3-D qui rend identiques les deux ortho-images de l'objet.

En pratique, on part d'un modèle approché, et on l'affine par tâtonnements en donnant à tour de rôle des petites variations aux différents paramètres qui définissent le modèle 3-D; on retient les variations qui ont pour effet

d'augmenter le coefficient de ressemblance des ortho-images. Les paramètres définissant les modèles 3-D sont par exemple :

- pour une facette de terrain définie dans un triangle ou un rectangle fixé : les altitudes des sommets du triangle ou du rectangle; dans ce cas, la corrélation contrainte par modèle 3-D n'est autre que la "corrélation par facettes", exposée dans le Bulletin d'Information de l'IGN n° 64, 1995/4.
- pour une maison : la position, l'altitude du pied, la longueur, la largeur, l'orientation, la hauteur, la pente du toit.

Pour expérimenter la méthode, dans le cas de la restitution des maisons, on a mis au point un logiciel interactif. Ce logiciel permet de faire varier manuellement, sous contrôle visuel, les valeurs des paramètres du modèle; l'expérimentateur voit sur l'écran le modèle de maison incrusté dans les deux images et les deux ortho-images locales, avec leur coefficient de corrélation; on affiche aussi la combinaison des deux ortho-images, qui, lorsque le modèle correct est trouvé, est une ortho-image sans devers où il ne reste en blanc que la petite portion de terrain éventuelle qui était cachée dans les deux images à la fois.

Des essais sur des images de diverses résolutions semblent montrer le bien-fondé du principe. Plus précisément, on a observé que lorsque le modèle de la maison s'ajuste le mieux aux photographies, le coefficient de corrélation passe bien par un maximum; en d'autres termes, le coefficient de corrélation peut guider la recherche du modèle 3-D.

Qualités requises d'une modélisation numérique du relief pour les applications à la cartographie à moyenne échelle (thèse de Gil Gonzalves)

Une description d'un relief, qu'elle soit graphique : courbes de niveau; analogique : carte en relief; numérique : MNT, est une image simplifiée, qu'on peut appeler un "modèle", de la réalité. Le degré de simplification dépend du niveau de détail qu'on souhaite voir apparaître dans ce modèle. En particulier, pour les cartes à moyenne échelle 1 : 25 000 et 1 : 50 000, où le relief est figuré en courbes de niveau, les réalisateurs : topographes, photogrammètres, cartographes (ainsi que les utilisateurs ?), ont tous sensiblement la même "idée" du niveau de détail souhaitable; cette idée résulte d'une synthèse entre plusieurs contraintes : précision permise par les instruments de mesure, exactitude du tracé de chaque courbe prise individuellement, cohérence des courbes entre elles pour un rendu suggestif des formes du terrain, lisibilité de la carte. Cette "idée" se traduit par le choix d'une équidistance, qui est une donnée objective, et pour chaque courbe de niveau par un filtrage à vue des petits détails, qui est une opération beaucoup plus subjective.

L'objectif de la recherche est d'explicitier, autant que possible par des propriétés mathématiques, ou du moins par des critères quantitatifs, cette "idée" commune à tous du bon niveau de détail.

Un premier pas pour cela est d'essayer de dégager les propriétés géométriques d'une surface connue seulement par un échantillon de courbes de niveau. Les courbes de niveau étant difficiles à manipuler, on leur substitue immédiatement un modèle maillé régulier; ce qui amène alors la question : le modèle maillé de substitution est-il bien équivalent au système initial de courbes ? Pour qu'il y ait équivalence, il ne suffit pas que le modèle maillé redonne correctement les courbes initiales, ce qui est assez facile à obtenir; il faut aussi selon nous, qu'il puisse donner des courbes intercalaires présentant le même degré de généralisation que les courbes initiales, et s'intégrant parfaitement à celles-ci. L'idéal est qu'on ne distingue pas quelles courbes sont les intercalaires.

Le problème de l'élaboration d'un modèle maillé à partir d'un système de courbes de niveau nous semble donc primordial. C'est pourquoi en 1997, on a continué à apporter quelques adaptations à la méthode de la "grille élastique" de G. Masson d'Autume, qui nous sert à construire ce modèle maillé : fabrication d'un modèle bicubique, courbure invariante par rotation en incorporant les dérivées secondes croisées, tangentes à la surface contraintes par les tangentes aux courbes de niveau.

C.1.3 Restitution des bâtiments pour la cartographie à grande échelle

Olivier Dissard, Frank Fuchs et Laurent Guigues

Contexte et objectif

Cette action s'intéresse à la reconstruction du bâti pour une cartographie urbaine 3D. Pour cela elle s'appuie sur des images aériennes de résolution 10 à 40 cm. Débutée courant 1997, cette action doit s'échelonner sur 4 à 5 années. Elle part de l'expérience et des résultats acquis durant les travaux de Caroline Baillard et Olivier Dissard sur l'imagerie de moyenne résolution (30 cm à 1m) (voir l'article long correspondant dans ce bulletin), dont elle exploite les résultats encore intéressants aux résolutions proches de 20 cm.

Dans cette recherche, on ne fait plus une analyse globale de la scène figurant sur les images, mais on se situe au niveau de l'analyse locale, le but est une reconstruction 3-D du bâti qui correspondrait aux besoins de la cartographie urbaine à grande échelle. C'est pourquoi on ne s'intéresse pas seulement à la forme extérieure des zones de bâti

(reconstruction du bâti sous forme de polygone correspondant aux gouttières), mais aussi aux détails intérieurs des toits (reconstruction en 3D des pans de toit).

Durant l'année 1997 qui a vu se débiter la thèse de Frank Fuchs (direction Hervé Le Men), trois actions ont été menées sur ce sujet :

Restitution automatique de bâtiments à l'aide de *snakes* polygonaux (stage Grégoire Maillet)

Les travaux effectués durant ce stage concernent l'analyse des images de moyenne résolution. Nous disposons des zones de sursol et de leur caractérisation en bâti ou végétation (voir les articles d'O. Dissard dans ce bulletin et dans le bulletin n° 68). Le paramétrage des algorithmes nous assure que sur de telles images, chaque zone de sursol classée bâti regroupe un ou plusieurs bâtiments situés à la même altitude (à la valeur d'un étage près, c'est à dire 2m, près). Nous désirons en avoir une représentation sous forme polygonale (vecteur) représentant les frontières 'aux gouttières' des bâtiments ou pâtés de maisons. Le stage a consisté à appliquer tout d'abord à chaque zone de sursol, un modèle d'approximation de contours favorisant les angles droits, puis à le repositionner finement à l'aide de *snakes* polygonaux.

Les résultats sont prometteurs en ce qui concerne les bâtiments isolés mais la méthode se révèle encore insuffisante dès que l'on aborde des pâtés de maisons complexes.

Référence

[MAILLET 97] G. Maillet : *Restitution automatique de bâtiment à l'aide de snakes polygonaux*, rapport de stage de DEA d'Intelligence artificielle, reconnaissance des formes et applications de l'Université Pierre et Marie Curie, IGN-SR 970032/C-STA, 1997.

Recalage de modèles indéformables de bâtiments pour la restitution semi-automatique du bâti répétitif (Laurent Guigues)

Dans les zones pavillonnaires, il est fréquent d'observer de nombreuses maisons construites sur le même modèle. Un restituteur travaillant sur une telle zone répètera donc de nombreuses fois la même description graphique. Pour toutes les séries de bâtiments identiques. Suite à cette constatation, il est apparu opportun d'étudier dans quelle mesure on pouvait faciliter la restitution des lotissements au bâti répétitif, par l'utilisation multiple d'un même modèle via l'introduction d'algorithmes de recalage automatique du modèle sur un couple stéréoscopique.

La perspective dans laquelle nous nous sommes placés est celle d'une restitution 3-D à facettes des maisons, de type TRAPU, où la description complète de la surface du toit par toutes ses arêtes internes est saisie. La résolution des images étudiées est d'environ 20 cm. La procédure proposée est la suivante :

- si le modèle de la nouvelle maison à saisir n'a encore jamais été vu (nouvelle série), l'opérateur effectue une saisie complète normale. En outre, il indique un point particulier, dit d'attache, qui sera le point par lequel il manipulera le modèle par la suite,
- si la nouvelle maison est d'un modèle déjà connu, l'opérateur se contente d'un pointé approximatif du point d'attache du modèle. L'ordinateur émet alors automatiquement des hypothèses de placement du modèle sur les images. L'opérateur déroule ces hypothèses et valide la bonne position, ou rejette toutes les hypothèses si aucune n'est bonne.

La tâche de l'algorithme de recalage est donc de retrouver l'orientation de la maison, totalement inconnue, et sa position précise en x,y,z connue approximativement. La méthode s'articule en deux grandes étapes : la première émet des hypothèses de placement et la seconde évalue ces hypothèses afin d'ordonner et de retenir les bons recalages.

La première s'appuie sur les contours des deux images et est hiérarchique : on commence par émettre des hypothèses d'orientation par utilisation des signatures des segments-images dans un espace de Hough. Pour chaque hypothèse d'angle, on effectue un appariement des segments droite et gauche de l'image, guidé par le modèle afin de proposer des altitudes possibles. Enfin, pour chaque couple d'hypothèses d'angle et d'altitude, on réalise un recalage planimétrique fin sur les maxima de gradient des deux images.

L'étape d'évaluation des propositions utilise des indices orientés-régions, plus robustes, mais plus coûteux à mettre en œuvre, et qui ne peuvent donc intervenir qu'après le dégrossissement préalable effectué en première étape. On utilise, en effet, une mesure de corrélation des deux ortho-images gauche et droite locales, induites par la position du toit, un calcul d'homogénéité moyenne de chaque pan de toit et un indice d'emboîtement entre des segmentations-images et la partition induite par les facettes du modèle.

Une évaluation de cette méthode a été réalisée sur des images noir et blanc scannées, à 22,5 cm de résolution, comportant 177 bâtiments de huit modèles différents. Le premier recalage proposé est alors bien positionné (à 1 m près par rapport à une référence) à 91%. En outre, les EMQ en cas de réussite sont de 1,3 degrés en orientation, 40 cm en altitude et 20 cm en planimétrie.

Ce travail est le premier pas dans une direction de recherche nouvelle : l'étude des possibilités d'introduction de procédures interactives utilisant du traitement d'image pour faciliter la restitution, en particulier du bâti à grande échelle.

Référence

[GUIGUES 97] L. Guigues : *Recalage de modèles indéformables de bâtiments pour la restitution semi-automatique du bâti répétitif*, rapport interne, IGN-SR 970033/C-RAP, 1997.

Modélisation de données 3-D bâti à l'aide de grammaires de modèles (Frank Fuchs)

La reconstruction automatique du thème bâti est vue sous l'angle des images à grande échelle (la taille du pixel au sol est de l'ordre de 10 cm). L'objectif envisagé est la reconstruction des formes des toits (i.e. la forme générale donnée par les gouttières, mais aussi les pentes intérieures à la surface). Les premiers travaux visant cette reconstruction se sont portés sur la détection de primitives planes en trois dimensions correspondant aux pans de toits. Le processus mis en œuvre est une croissance de région dont le point de départ est une carte de disparité obtenue au moyen de l'algorithme de C. Baillard (voir l'article B.2 sur ce sujet dans ce bulletin). La carte de disparité est segmentée en régions planes correspondant aux pans de toits, ou parfois, aux façades des bâtiments. On obtient ainsi des primitives 3-D, un des points de départ de la reconstruction.

Ces travaux sont effectués dans le cadre d'une thèse qui a débuté fin 1997.

Les travaux envisagés pour l'avenir proche concerneront la détection de primitives linéaires conjointement avec les primitives planes, dans un système de reconstruction utilisant simultanément ces deux types de primitives.

Référence

[BENZENATI 97] A. Benzenati : *Approximation des profondeurs d'une scène urbaine à partir d'images à grande échelle*, mémoire de DESS, IGN-SR 970003/C-STA, 30 septembre 1997.

[THIERRY 97] François Thierry : *Élaboration d'une interface homme-machine pour l'étude de modèles paramétriques de bâtiments sur des couples stéréoscopiques d'images aériennes à grande échelle*, mémoire de DESS, IGN-SR 970004/C-STA, 31 octobre 1997.

C.1.4 Détection de changement pour la BD TOPO

Franck Jung et Olivier Jamet

Contexte et Objectifs

L'objectif de cette recherche est la mise en œuvre de stratégies d'interprétation permettant la détection de changements topographiques dans une optique d'analyse exhaustive de la surface de la scène. Dans le processus opérationnel de mise à jour de la BD TOPO, un tel traitement viendrait en amont du travail de l'opérateur, de façon à limiter sa zone d'investigation aux seules régions du couple de photographies où l'on suspecte des changements. Deux approches complémentaires sont étudiées afin d'atteindre cet objectif.

Comparaison Image-image (Franck Jung)

Cette étude a débuté en 1997. Dans ce cadre, une thèse de l'Ecole Polytechnique, encadrée par Donald Geman (UMASS), a débuté en septembre 1997. Une approche thématique a été adoptée. L'étude s'est focalisée sur les objets constituant le sursol (bâti et végétation). Afin de comparer de façon fiable des primitives (éléments de contour, points d'intérêts, éléments de textures) provenant de deux dates différentes, une première étape constitue à reconnaître grossièrement l'objet auquel appartiennent ces primitives extraites. Plusieurs études ont démarré afin d'atteindre ces objectifs :

- une première étude (grossière) concernant la détection de bâtiments a été réalisée. Cette étude a été basée sur une technique d'apprentissage en monoscopie utilisant des arbres de décision [JUNG et al 97]. Les taux de sous-détections et de sur-détections sont tous les deux voisins de 10%. Ces résultats laissent présager des améliorations du taux de reconnaissance en utilisant plusieurs images permettant ainsi de travailler dans l'espace objet,
- des extractions de primitives 3-D de type coins et droites avec estimation du taux d'erreur ont été réalisées. Leur intégration dans un processus de décision est en cours,
- une étude ayant pour but l'indexation de zones texturées (végétation) a démarré en collaboration avec le laboratoire SIP (Paris-5). La végétation pouvant avoir des aspects différents en fonction de la date de prise de vue, il est important de pouvoir caractériser cette végétation indépendamment de la date de prise de vue,
- la présence d'ombres (différentes suivant les dates de prise de vue) dans les images peut également constituer de faux changements (ne correspondant pas à des changements topographiques). Une étude ayant pour but la détection des zones d'ombres a été menée par Régis Ferrier [FERRIER 97]. Cette étude a permis d'exhiber par

des techniques de croissance de régions, après prédiction des zones d'ombres à l'aide d'un MNE (Modèle Numérique d'Élévation), 80% des zones d'ombres. Des études complémentaires devront être menées dans ce domaine.

Comparaison Vecteur-Image (Olivier Jamet)

L'objectif est ici, en complément de l'axe précédent (image - image), de valider automatiquement les vecteurs d'une base existante par comparaison à de nouvelles images. Ce travail est effectué dans le cadre d'une thèse de l'ENST, encadrée par Henri Maître (ENST) et Hervé Le Men (IGN).

Activité 1997

La démarche choisie tente d'effectuer une comparaison des vecteurs de la base à des données tridimensionnelles extraites par un processus d'appariement. En 1997, on s'est intéressé au problème de la mesure de la confiance à accorder aux extractions 3-D automatiques. Un modèle du processus d'appariement a été proposé. Il repose sur l'implémentation des contraintes photogrammétriques sous la forme d'un graphe matérialisant l'ensemble des surfaces 3-D possibles. Cette modélisation est limitée aux sections épipolaires (vis-à-vis du couple traité) de la surface, de façon à rendre la combinatoire acceptable. Il permet, par des algorithmes linéaires en fonction du nombre de ses arcs, de calculer une mesure de l'ambiguïté de la surface, dont les propriétés de normalisation permettent de la considérer comme une probabilité.

Le modèle a été testé sur une assez grande variété d'images. Il semble donner des résultats assez stables tout en étant contrôlé par un petit nombre de paramètres.

Travaux en cours

L'utilisation de ces résultats pour le contrôle de la base de données vecteur est en cours de développement. La stratégie envisagée consiste à confronter les vecteurs existants à trois critères, choisis en fonction des spécifications de contenu de la BD TOPO :

- compatibilité de l'emprise cartographique (2-D) avec les extractions,
- compatibilité de la position 3-D des vecteurs délimitant les îlots,
- compatibilité de la représentation des discontinuités internes aux îlots.

L'exploitation de la mesure d'ambiguïté des extractions automatiques pour cette vérification reste délicate. Il apparaît qu'une telle mesure n'est pas suffisante pour traduire la fiabilité des extractions (une extraction non ambiguë peut être fautive, en particulier dans les zones homogènes de l'image) et qu'il faudra lui adjoindre une mesure de la quantité d'information disponible (contraste local de l'image par exemple).

Dans les semaines à venir, une série d'expériences doit être mise en œuvre pour confronter les possibilités de diagnostic de non-changement offertes par cette approche à des approches plus simples (telles que la comparaison directe des vecteurs à des MNE non qualifiés par une mesure de fiabilité).

La thèse devrait être soutenue à la fin du premier semestre 1998.

Publications

[FERRIER 97] R. Ferrier : *Détection des ombres dans les images aériennes*, rapport de stage de DESS, laboratoire MATIS, IGN-SR 970006/C-STA, septembre 1997.

[JAMET 97a] O. Jamet : *Comparaison vecteur-images pour la détection des changements du thème Bâti de la BD TOPO*, Communication Orale, Journées de la Recherche de l'IGN, laboratoire MATIS, IGN-SR 970025/C-COM, mars 1997.

[JAMET 97b] O. Jamet : *Probabilisation de l'espace des hypothèses 3-D dans un processus de mise en correspondance - Approche théorique*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 970027/C-RAP, 30 juin 1997.

[JAMET 97c] O. Jamet : *Construction d'une loi de probabilité sur l'ensemble des surfaces possibles - premiers résultats expérimentaux*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 970028/C-RAP, 15 juillet 1997.

[JAMET 97d] O. Jamet : *Comparaison Vecteur-Image pour la Détection des Changements : Application à la mise à jour du thème bâti de la BD TOPO*, rapport annuel de thèse, laboratoire MATIS, IGN-SR 970029/C-RAP, septembre 1997.

[JUNG et al 97] F. Jung, B. Jedynek & D. Geman : *Recognizing Buildings in Aerial Images*, Ascona Workshop, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), Birkhäuser, Basel (CH), laboratoire MATIS, IGN-SR 970021/C-COM, 1997.

C.1.5 Extraction automatique des routes sur images aériennes

Ghislaine Bordes et Laurent Guigues

Contexte

Le laboratoire MATIS dispose d'un ensemble de méthodes d'extraction de routes qui ont été développées et expérimentées au cours des différents travaux de thèses réalisés ces dernières années. Cette recherche se propose de tirer parti de ces travaux pour définir et développer une maquette de système d'extraction automatique des routes, en s'attachant plus fortement aux contraintes opérationnelles de précision, de fiabilité et de robustesse exigées pour la saisie des routes de la BD TOPO.

Objectif

Notre objectif est de définir un système d'extraction de routes qui permette d'atteindre des résultats fiables, qui soient faciles à contrôler - et éventuellement à corriger - manuellement. Un effort tout particulier doit donc être fait pour que le système auto-évalue la qualité des routes qu'il a extraites.

Principe général

Les travaux précédents ont montré qu'il est indispensable d'utiliser des données *a priori* (une carte scannée ou une base de données vecteur déjà existante, par exemple) pour guider l'extraction de routes dans les images et parvenir à un résultat suffisamment fiable. Nous considérons donc que les données dont nous disposons sont, d'une part, un couple stéréoscopique d'images aériennes, et d'autre part, un graphe routier *a priori* de précision cinq à vingt mètres.

Le système d'extraction de routes a été défini. Ce système, qui est en cours de développement, est modulaire, et doit pouvoir évoluer, notamment en intégrant de nouveaux algorithmes de détection ou de nouveaux types de données en entrée (images couleur, ortho-images...). De façon générale, l'extraction de route est tout d'abord réalisée indépendamment pour chaque arc du graphe *a priori*, en limitant la zone de recherche dans l'image au voisinage de l'arc. Puis le graphe est reconstruit. Le traitement des carrefours fait l'objet d'une recherche à part entière dont les résultats pourront être utilisés ultérieurement.

L'extraction se fait en trois étapes :

- détection des primitives routières pour chaque tronçon routier du graphe *a priori*. Pour chaque arc du graphe *a priori*, différents algorithmes de détection de routes peuvent être appliqués. La détection est limitée au voisinage de l'arc, de plus les informations géométriques et sémantiques (type de route...) de cet arc peuvent être utilisées pour contraindre les algorithmes de détection,
- validation des primitives. La qualité des primitives détectées précédemment est évaluée,
- recalage global des tronçons routiers du graphe *a priori* sur les primitives routières validées. Dans un premier temps, le meilleur sous-ensemble de primitives est identifié - en fonction des caractéristiques intrinsèques des primitives et de critères de compatibilité inter-primitives. Les portions de routes n'ayant pu être détectées dans l'image sont interpolées. Enfin, le graphe est reconstruit.

Utilisation de modèles numériques d'élévation (MNE) pour la détection de routes en zone urbaine

Les méthodes de détection de routes mises en œuvre jusqu'ici sont peu fiables en milieu urbain dense, les critères utilisés (homogénéité radiométrique, forme allongée...) conduisant souvent à identifier des bâtiments comme des routes. L'utilisation de Modèles Numériques d'Élévation (calculés par corrélation automatique) pour éviter ces confusions a été étudiée [ARNIM 97]. Le MNE correspondant à la scène urbaine à traiter permet dans un premier temps de limiter la recherche des routes aux zones de l'image correspondant à des zones au sol. Les critères classiques radiométriques et géométriques sont alors utilisés pour identifier - dans ces zones au sol - des amorces de routes. Les confusions avec des toits de bâtiments sont ainsi évitées. Dans un second temps, ces amorces sont utilisées pour recalculer un réseau routier approximatif fourni par une base de données vecteur (la BD CARTO de l'IGN, par exemple).

Enfin, une densification de ce réseau routier est réalisée, en connectant les amorces de routes isolées répondant à des critères d'alignement. Les hypothèses de routes ainsi constituées sont validées si elles sont suffisamment homogènes radiométriquement et si elles ne traversent pas de zones de sursol (bâtiments...).

Publications

[ARNIM 97] A. von Arnim : *Utilisation de modèles numériques d'élévation pour la détection de routes sur images aériennes*, rapport de stage du DEA, laboratoire MATIS, IGN-SR 970007/C-STA, septembre 1997.

[BORDES 97] G. Bordes : *Interprétation d'images aériennes guidée par une base de données cartographiques : application à l'extraction automatique des routes*, thèse de doctorat de l'université de Marne-la-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 970001/C-THE, juin 1997.

[BORDES et al 97a] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Automatic Road extraction from Grey-Level Images based on Object Database*, in Actes du congrès SPIE Aerosense, vol. 3072, Orlando (USA), laboratoire MATIS, IGN-SR 970020/C-COM, avril 1997.

[BORDES et al 97b] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Road modeling Based on a Cartographic Database for Aerial Image Interpretation*, in Actes du séminaire "Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps", Birkhäuser Verlag, Bonn (D), laboratoire MATIS, IGN-SR 970023/C-COM, mai 1997.

C.1.6 Restitution automatique des carrefours routiers

Sylvain Airault

Objectifs

L'interprétation des carrefours est une étape essentielle de la reconnaissance automatique du réseau routier. Pour limiter la complexité du problème, nous cherchons à utiliser au mieux des données externes apportant une connaissance sur la géométrie (localisation approchée) et la topologie (nombre de branches, organisation des branches) du carrefour. Ces données externes sont fournies par la Base de Données Cartographiques de l'IGN (BD CARTO) dont la précision géométrique est de l'ordre de dix mètres et qui représente les branches principales du carrefour sans assurer une description fine des connexions internes au carrefour.

Il s'agit donc d'une approche descendante dans laquelle la connaissance a priori doit nous permettre de choisir entre différents modèles de carrefours et de piloter les traitements en conséquence.

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse : cette thèse, réalisée à l'IGN par Nicolas Boichis, a débuté en novembre 1996. Elle est dirigée par Jean-Pierre Cocquerez (ENSEA).

Même si la plupart des objectifs applicatifs sont formulés pour des échéances d'ici deux ou trois ans, on prévoit cependant de définir un système permettant, dans une configuration minimale, de traiter les carrefours les plus simples dans des délais plus courts.

Travail réalisé

- Analyse des données BD CARTO : une étude des spécifications de la BD CARTO met en évidence les connaissances qui peuvent être utilisées pour aider au processus d'interprétation des images.
- Mode de représentation des connaissances : une étude bibliographique inventorie les différents formalismes utilisés en Intelligence Artificielle pour représenter les connaissances. Cette étude a conduit au choix d'un système basé sur des règles de production dont l'implémentation a débuté par la mise en place du moteur d'inférence et d'une base de règles destinées à expliciter la connaissance implicite contenue dans les données BD CARTO (en combinant des attributs sémantiques et des mesures sur la géométrie des branches du carrefour pour émettre un diagnostic sur la présence éventuelle d'un axe principal, d'un rond-point ou d'un type de carrefours particulier).
- Détection des formes circulaires dans l'image : parallèlement à la définition et à la mise en œuvre de la stratégie d'interprétation, nous avons commencé à développer les algorithmes de bas-niveau qui vont extraire dans l'image les informations nécessaires à la prise de décision. Un algorithme de détection de formes circulaires a été développé pour permettre de diagnostiquer la présence d'un rond-point. Cet algorithme est basé sur l'utilisation d'une variante de la transformée de Hough.

Perspectives

L'objectif prioritaire est maintenant de valider la démarche en réalisant un système capable de traiter les carrefours les plus simples (à trois branches sans terre-plein) et de reconnaître son incompetence sur les carrefours qui ne seraient pas de ce type.

Les problèmes suivants doivent être abordés rapidement de manière à pouvoir valider le système minimal :

- Le développement des algorithmes de bas-niveau nécessaires au fonctionnement minimal du système : il s'agit à la fois des mesures images qui vont permettre de recalibrer les branches et des méthodes d'interpolation qui vont permettre de reconstruire le carrefour à partir de quelques points de passage et de la sémantique attachée au carrefour.

- La prise en compte, dans la base de règles, de la connaissance procédurale associée aux algorithmes de bas-niveau : choix du paramétrage, gestion de l'incertitude sur les résultats,...
- La mise en place d'une méthode de comparaison automatique avec les données de référence BD TOPO permettant d'évaluer les performances du système.

La démarche envisagée ensuite consistera surtout à aborder les problèmes liés à la gestion de l'incertitude dans le système :

- La prise en compte d'une mesure de qualité et d'une mesure d'ambiguïté sur les primitives images : on entend par qualité une mesure absolue quantifiant la confiance accordée à une mesure et par ambiguïté une mesure relative aux hypothèses concurrentes. On considérera, par exemple, qu'il y a ambiguïté si un algorithme de détection de bords de routes renvoie deux hypothèses très différentes en termes de localisation mais de qualités équivalentes.
- La prise en compte, de la même manière, d'une incertitude sur les décisions qui sont prises à travers toutes les règles. Il faudra également définir un mécanisme de propagation de cette incertitude.
- La gestion d'un historique des décisions pour pouvoir définir un mécanisme de retour à un état antérieur en cas d'échec du raisonnement.

Le système, à ce stade, devrait pouvoir évoluer facilement pour prendre en compte de nouveaux modèles de carrefours. On tentera alors de vérifier cette hypothèse en intégrant dans le système le traitement de types de carrefours plus nombreux.

C.1.7 Passage en production, d'outils semi-automatiques pour le routier

Sylvain Airault

Contexte – objectifs

Le laboratoire MATIS développe depuis plusieurs années une méthode de saisie semi-automatique des routes pour la Base de Données Topographiques de l'IGN (BD TOPO). De premiers tests avaient été effectués en 1996 par les chercheurs sur un nombre réduit de sites test, de manière à évaluer les temps de saisie et vérifier la qualité des résultats obtenus.

Une étude plus complète a été réalisée en 1997 pour généraliser les résultats obtenus à l'ensemble des paysages et pour faire participer des opérateurs habitués à la saisie manuelle traditionnelle. Même si l'application est un prototype non industriel, une interface homme / machine conviviale et un mode opératoire simple permettent à un opérateur de l'utiliser sans formation préalable.

Résultats

Les résultats de l'étude sont plutôt encourageants, tant du point de vue technique (les performances de l'application) que du point de vue humain (l'acceptation de l'outil par les opérateurs) :

- Les temps de saisie observés mettent en évidence des gains de productivité assez sensibles sur certains paysages (20% à 30% de temps gagné sur des zones rurales non boisées).
- Les opérateurs arrivent à cerner rapidement les conditions d'utilisation de l'algorithme de suivi automatique. C'est un élément important : si les opérateurs n'arrivaient pas à prédire les échecs, l'outil serait rapidement abandonné.
- Les opérateurs semblent bien accepter l'outil. Sa conception semi-automatique demande encore une forte implication de l'opérateur et ne le dépossède pas de son savoir-faire.

La conclusion de l'étude est donc que l'application de saisie semi-automatique des routes doit sortir des laboratoires de recherche et peut être mise entre les mains des services de production qui mèneront les études complémentaires.

Suites à donner

La dernière étape avant une mise en production consiste à définir la manière d'intégrer la saisie semi-automatique des routes dans le processus complet de saisie de la BD TOPO. Il faut prévoir soit d'intégrer le suivi automatique de routes dans l'application de saisie existante, soit de développer une nouvelle plate-forme spécifique qui traiterait exclusivement le réseau routier. Cela peut avoir des répercussions sur les coûts de développement et d'exploitation mais aussi sur l'organisation de la production et la gestion du personnel.

Publication

[AIRAULT 97] Sylvain Airault : *Etude préalable à la mise en production d'un processus de saisie semi-automatique du réseau routier pour la BD TOPO*, rapport interne, IGN-SR 970002/C-RAP, juillet 1997.

C.1.8 Suivi automatique de routes : vers une utilisation à plus basse résolution

Sylvain Airault

Contexte - Objectifs

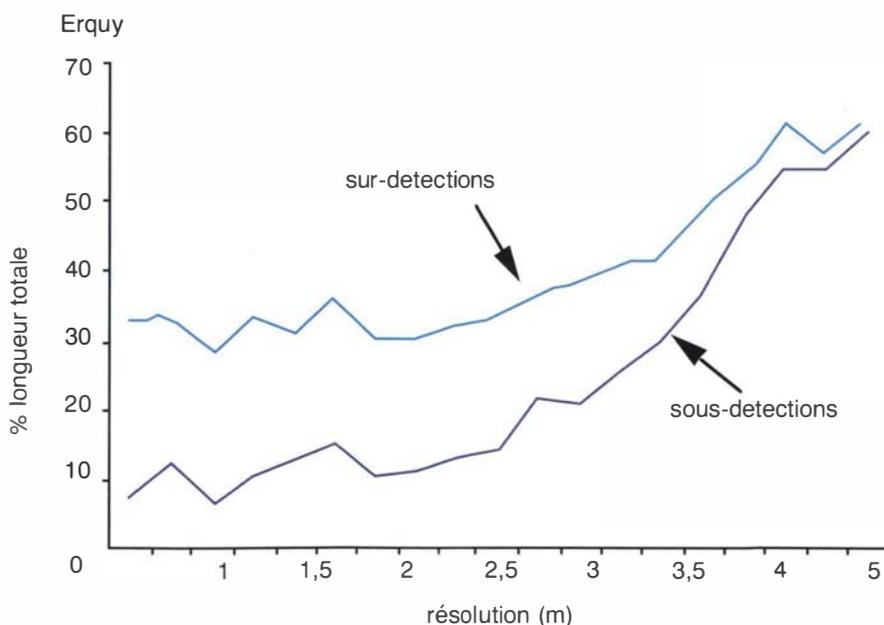
La méthode développée au laboratoire MATIS pour extraire automatiquement les routes est fortement liée à l'utilisation d'images aériennes à haute résolution (environ 50cm). Cependant, il est intéressant de chercher à connaître plus précisément les limites d'utilisation du fait de la disponibilité prochaine d'images satellitales ayant des résolutions de un à cinq mètres.

L'algorithme utilisé est sensible à la résolution dans la mesure où les routes sont modélisées comme des objets surfaciques (on modélise la surface de la chaussée et les deux bords) mais est peu sensible à une dégradation de la qualité radiométrique.

Résultats

Les tests que nous avons effectués consistent à simuler des images à différentes résolutions par sous-échantillonnage des images aériennes puis à sur-échantillonner les images simulées pour travailler systématiquement avec une résolution de 50 cm et des radiométries interpolées. Les résultats obtenus sont ainsi issus d'un jeu d'amorces de routes uniques saisies manuellement à pleine résolution (environ une amorce par tronçon de route joignant deux carrefours).

Le suivi de route a été lancé systématiquement à partir de chaque amorce pour chacune des résolutions (de 0,5 m à 5 m). On a mesuré, pour chaque résolution, le taux de sur-détections et le taux de sous-détections par appariement automatique avec un graphe de référence. Les sur-détections correspondent aux points du graphe test qui n'ont pas d'homologue dans le graphe de référence. Les sous-détections correspondent aux points du graphe de référence qui n'ont pas d'homologue dans le graphe test. Les tests ont été effectués sur trois sites qui présentent des caractéristiques différentes : une zone très rurale (Erquy), une zone rurale contenant un village (St-Piat) et une zone péri-urbaine (Chartres).



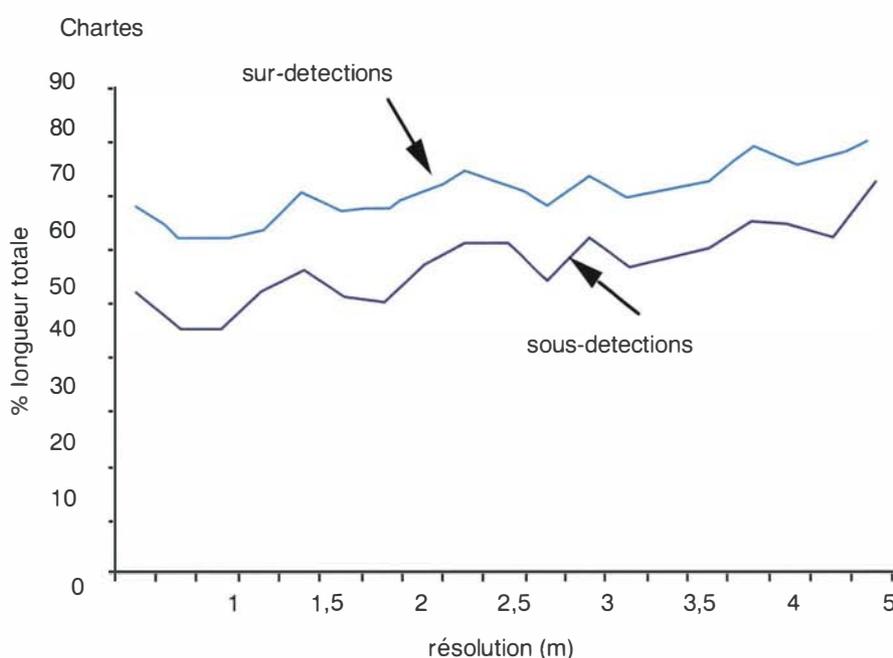
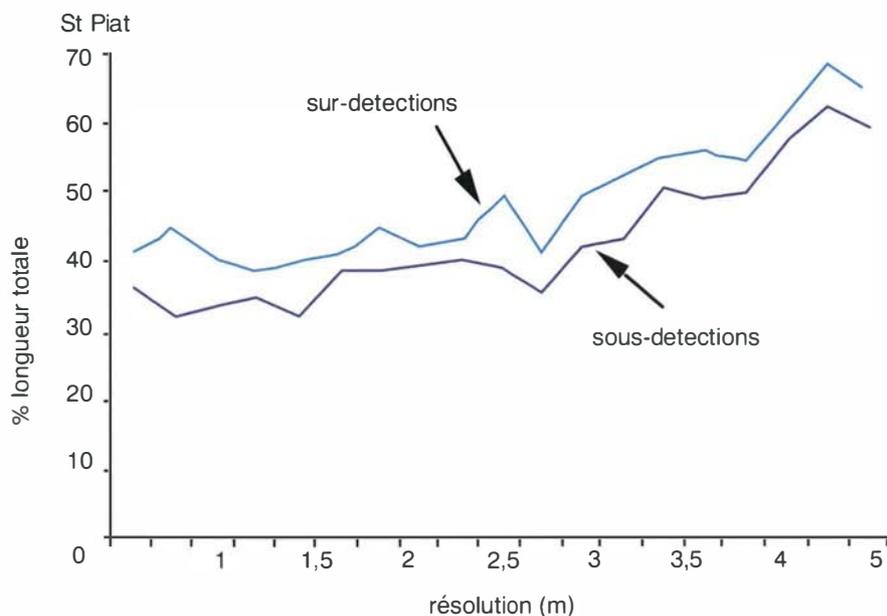


figure C.1.8.1 : taux d'erreurs en fonction de la résolution

On constate sur ces graphiques plusieurs tendances :

- Il y a une forte corrélation entre la dégradation du taux de sous-detections et celle du taux de sur-detections. La dégradation de la résolution affecte globalement la qualité du résultat sans jouer spécifiquement sur l'une ou l'autre des composantes de l'erreur.
- Sur la zone péri-urbaine, le résultat est globalement assez mauvais et la dégradation de la qualité semble proportionnelle à la dégradation de la résolution.
- Sur les deux sites ruraux, on remarque deux tendances : la pente de la courbe est faible jusqu'à environ trois mètres de résolution et augmente très sensiblement après. Cela s'explique très bien de part la taille des objets que l'on recherche : au delà de 3 m, les deux bords de la route peuvent commencer à être confondus dans l'image.

Suites

Les résultats des tests montrent que, sur des sites ruraux, l'algorithme développé pour les images aériennes à 50 cm de résolution peut donner des résultats corrects jusqu'à une résolution proche de 3 m. Cependant, si l'on souhaitait utiliser l'algorithme dans cette gamme de résolution, il serait tout de même souhaitable de renforcer sa fiabilité en ajoutant des contraintes propres à cette résolution de travail.

C.1.9 Bibliothèque de photogrammétrie numérique

Yann Wehrstedt

Contexte et objectifs

Les actions de recherche du laboratoire MATIS font un appel d'une manière croissante à des données d'aérotriangulation et à des fonctionnalités de photogrammétrie. En effet, qu'il s'agisse de croiser des informations provenant de missions de dates différentes (multi-temporel), d'extraire des objets de N images simultanément (multi-corrélation si $N > 2$), provenant, pourquoi pas, de sources différentes (multi-capteurs), ou plus généralement de travailler en stéréoscopie sur une zone étendue, la maîtrise de l'aérotriangulation et la disponibilité de fonctions de photogrammétrie précises et pratiques, regroupées sous la forme d'une bibliothèque, sont indispensables.

D'autre part, une mission du laboratoire MATIS est d'assurer le passage en production des images de la caméra numérique du laboratoire OEMI, c'est-à-dire de prouver qu'une utilisation photogrammétrique de ces images est possible.

Travaux effectués

Les utilisateurs de données et de fonctions de photogrammétrie du laboratoire MATIS ont été interrogés quant à leurs besoins. Leurs réponses ont abouti à deux versions de [WEHRSTEDT 97], document qui n'a pas encore terminé son cycle auteur-lecteur.

L'aspect "recueil de l'expérience IGN en matière d'aérotriangulation" a donné lieu à la rédaction de [WEHRSTEDT, EGELS 97], ainsi qu'à la programmation du logiciel TopAéro-PC. Ce logiciel réalise le portage sur PC des procédures de calcul mises au point dans TopAéro-VAX, logiciel d'aérotriangulation actuellement employé au Département des Canevas de l'IGN, en mettant à profit les possibilités graphiques offertes par l'environnement Windows pour en améliorer l'ergonomie (voir la figure C.1.9.1). Il nous permet également de tester l'apport des modélisations de données proposées dans le cadre de la présente action pour la résolution de problèmes photogrammétriques particuliers.

L'aspect "passage en production des images de la caméra numérique" s'est traduit par des travaux d'aérotriangulation sur les missions de Lyon et du Mans. Les calculs effectués sur le bloc de Lyon ayant mis en évidence des lacunes dans l'étalonnage de la caméra numérique, cet aspect a été particulièrement soigné pour la mission du Mans, ce qui nous a permis d'obtenir de bons résultats de mise en place (résidus-images de l'ordre de deux microns pour des pixels de neuf microns), prouvant ainsi l'intérêt de ces images pour des travaux de photogrammétrie. Cette deuxième mission a également été l'occasion de tester un logiciel de mesure automatique de points de liaison (PHODIS-AT de ZEISS) et d'en évaluer l'apport dans le cas de la caméra numérique. Ces tests ont nécessité la mise au point d'une méthode de filtrage permettant de détecter les fautes dans les mesures-images des points de liaison. Cette méthode est décrite pour les couples d'images dans [XU, ZHANG 96]. Elle a été étendue à un bloc complet et intégrée à TopAéro-PC.

Suite

A court terme, le but est de terminer l'étude préalable de la boîte à outils de photogrammétrie et de l'implémenter. A moyen terme, il semble intéressant de se doter de processus de mesure automatique de points de liaison par multi-corrélation, qui viendraient compléter les logiciels de calcul déjà en place.

Référence

[XU, ZHANG 96] G. XU, Z. ZHANG : *Epipolar geometry in stereo, motion and object recognition*, Kluwer Academic Publishers, 1996.

Publications

[WEHRSTEDT 97] Y. Wehrstedt : *Étude préalable d'une boîte à outils de photogrammétrie pour le laboratoire MATIS*, laboratoire MATIS, IGN-SR 970030/C-RAP, 1997.

[WEHRSTEDT, EGELS 97] Y. Wehrstedt & Y. Egels : *Pratique de l'aérotriangulation à l'IGN*, laboratoire MATIS, IGN-SR 970031/C-ART, à paraître dans le bulletin de la SFPT, 1997.

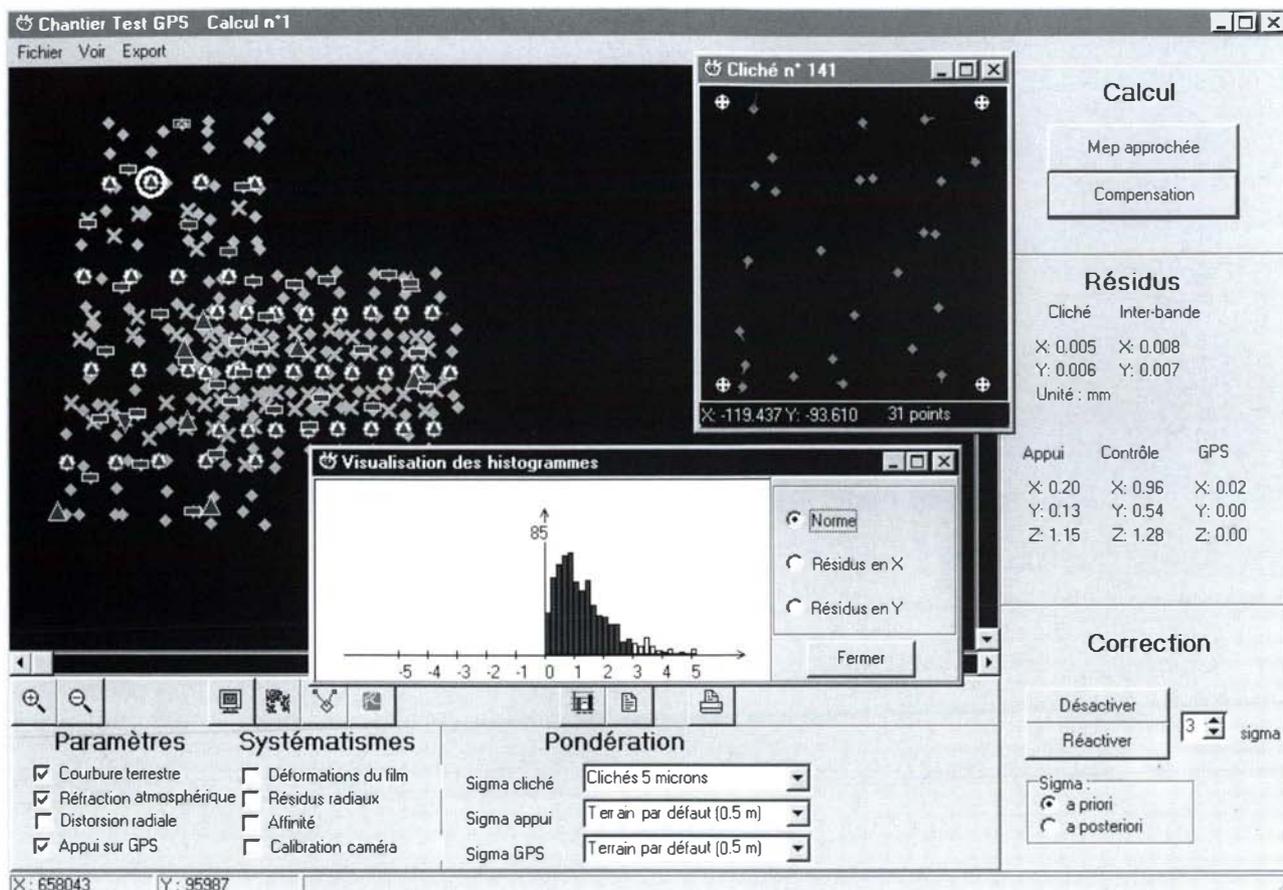


figure C.1.9.1 : interface de calcul du logiciel TopAéro-PC

C.1.10 Données multi-sources pour la restitution du relief en zone boisée

Sylvain Airault

Contexte

Les algorithmes de corrélation automatique utilisés pour restituer automatiquement le relief ne sont pas adaptés aux zones boisées. En effet, dans le meilleur des cas, ils vont donner une restitution au sommet des arbres alors que nous recherchons un relief au sol pour tracer les courbes de niveau. Par ailleurs, l'IGN dispose sur toute la France d'une base de données altimétriques (BD ALTI) issue de la numérisation des courbes de niveau des cartes au 1 : 25 000.

Ces données, compte tenu de leur processus de fabrication, n'ont pas une précision géométrique aussi bonne que celles obtenues par corrélation automatique des images à moyenne échelle mais elles donnent une bonne approximation des formes du terrain, y compris en zone boisée. Une utilisation conjointe des deux sources de données peut permettre une restitution complète : le MNT corrélé pour le terrain nu et le MNT de la BD ALTI pour les zones de sur-sol. Il suffit d'assurer la cohérence géométrique entre les deux MNT qui se traduit notamment par une continuité du terrain au niveau des raccords. On suppose pour cela que les frontières des zones boisées sont connues, le processus pouvant venir en aval d'une détection automatique des zones boisées ou s'intégrer dans une approche semi-automatique.

Objectifs

L'objectif de l'action de recherche était d'évaluer la possibilité de recalculer localement la BD ALTI sur un résultat de corrélation automatique en procédant en deux étapes :

- un recalage grossier en utilisant un modèle de déformation simple (translation en Z, rotation suivant un axe appartenant au plan moyen du MNT corrélé). La démarche est illustrée sur la figure C.1.10.1,
- une gestion fine des raccords entre les deux MNT par lissage local aux frontières. En effet, la minimisation globale des écarts en Z entre le MNT corrélé et la BD ALTI, compte tenu de la simplicité du modèle de déformation, ne garantit pas qu'il ne subsistera pas localement des hautes fréquences au niveau du raccord.

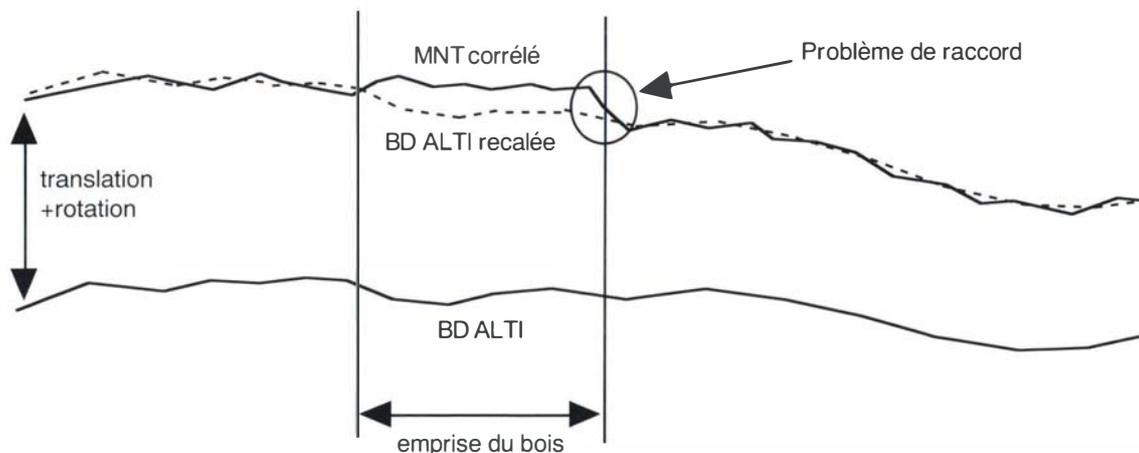


figure C.1.10.1 : recalage local de la BD ALTI sur le MNT corrélé

Résultats

Le recalage grossier du MNT BD ALTI sur le MNT corrélé est réalisé aux moindres carrés en cherchant à minimiser les écarts en Z sur la partie extérieure des zones boisées. Sur les zones-test utilisées, les déformations constatées entre la BD ALTI et le MNT corrélé sont très faibles (de l'ordre de un mètre pour la translation et de $0,1^\circ$ pour la rotation).

Après recalage de la BD ALTI sur le MNT corrélé et fusion des deux MNT, un examen visuel n'a pas permis de déceler des problèmes aux raccords. Cependant, le nombre réduit de sites-test ne permet pas de conclure sur l'absence de nécessité d'une étape de lissage local.

Suites à donner

Il serait maintenant nécessaire de valider la démarche sur un nombre de sites plus important et de préciser les limites d'utilisation des données de la BD ALTI en fonction des différents modes d'acquisition des données et des types de relief (en abordant notamment le cas des zones de montagne).

Publication

[HUET 97] Cécile Huet : *Tests de compatibilité entre MNT issus de corrélation automatique et MNT BDZ en vue d'une restitution du relief sur les zones de sur-sol étendu*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 970016/C-RAP, novembre 1997.

Christian Thom (responsable du thème instrumentation)

C.2.1 Prototype d'instrumentation aéroportée télémétrie laser (dispositif TAMS)

Olivier Bock et Michel Kasser

Contexte

Il s'agit de notre participation à la mise en valeur du procédé breveté par l'IGN en 1990. Une partie des études a été financée par un contrat avec Elf-Aquitaine (contrat à frais partagés). En 1993, nous avons validé une simulation numérique très complète du système projeté. Un contrat a été signé en octobre 1992, qui nous a permis de commencer le prototype du matériel embarqué et la réalisation de tests au sol. Un avenant en 1994 a permis de poursuivre le cofinancement. Cette étape a également nécessité l'achat d'un nouveau laser et d'un système informatique embarquable.

En 1995, des missions sur le terrain avaient été réalisées pour tester l'instrumentation, à Saint-Étienne de Tinée et à Combs la Ville, permettant de valider une partie du processus.

Ce travail a fait l'objet de la thèse de Olivier Bock depuis 1994; elle a été soutenue à la fin de l'année 1996.

Objectifs

Cette nouvelle méthode de mesure doit permettre d'évaluer des variations de position et notamment d'altitude de l'ordre du millimètre sur des surfaces importantes, en des points équipés de rétroreflecteurs laser. Ceci se révèle particulièrement important sur des zones d'extraction de fluides comme le pétrole ou le gaz, où les phénomènes de subduction sont symptomatiques de variations de contraintes dans le sous-sol.

L'originalité de la méthode réside dans la simplicité de son instrumentation : mis à part le laser picoseconde, classique en télémétrie laser mais relativement délicat à embarquer en avion ou en satellite, la détection compose simplement d'une photodiode de grande surface active, sans optique, d'un amplificateur large bande - faible bruit et d'un oscilloscope numérique rapide. La mesure simultanée d'au moins quatre distances (nécessaires pour localiser précisément l'avion et apporter une information sur le réseau de prismes) se fait grâce à la divergence importante du faisceau laser, obtenue par une lentille ou un dépoli. La très bonne précision du procédé est obtenue grâce à un traitement du signal numérique avant l'optimisation.

Activités - résultats

Deux études ont été menées en parallèle en 1997, dans le but de réaliser une mission de test final en avion prévue pour mars 1998. La première concernait l'instrument de mesure. Nous avons étudié différentes solutions d'amplificateur pour l'étage de détection et commencé l'optimisation de la solution retenue. Ce travail a été réalisé principalement par Patrick Nanjou Kwami, élève ingénieur en électronique, durant son stage de fin d'études (janvier à juin 1997). L'optimisation du système a été validée expérimentalement avec la source laser picoseconde de l'ESGT, reçue en fin d'année 1997. Dans cette étude d'instrumentation, nous avons également testé une photodiode à avalanche (ADVANCED PHOTONIX).

La seconde étude concernait la précision de la méthode. Elle a été réalisée à l'aide de simulations numériques, basées sur les résultats d'analyse théorique (thèse d'Olivier Bock) et expérimentaux (Combs la Ville, 1995). Les résultats de cette étude par simulations ont été présentés lors d'un congrès à Londres. Par ailleurs, les résultats de la thèse d'Olivier Bock ont été soumis pour publication dans le *Journal of Geodesy*. Cette seconde étude a montré que trois paramètres conditionnent la précision de la technique : la précision de télémétrie (instrumentation), la taille du réseau de réflecteurs, et la durée de vol (i.e. le nombre de tirs laser). Ces paramètres agissent au premier ordre. Il était intéressant de constater que l'altitude de l'avion et la divergence n'agissent qu'au deuxième ordre. De plus, la scintillation due à la turbulence atmosphérique n'a quasiment pas d'effet sur la précision finale, ce qui est plutôt rassurant.

La prochaine étape consiste à préparer la mission de mars 1998 qui devra se dérouler sur la base militaire de Creil. Nous bénéficions pour cela d'un financement de l'INSU à hauteur de 85 kF, ce qui permettra de couvrir les frais de mission avec l'ARAT. La mission nécessitera l'installation et la mesure par GPS en mode rapide statique d'un réseau

d'environ cinquante points, répartis sur une zone de 2 km par 3 km. Une étude spécifique par simulation numérique indiquera les conditions opérationnelles idéales pour la mission. L'instrument utilisé pour cette mission sera basé sur le laser de l'ESGT (50 ps / 100 ps, 100 mJ), fabriqué par BMI. Des essais de l'instrument seront à prévoir en laboratoire, voire à l'extérieur, par exemple à Combs la Ville, en janvier 1998.

Publications

[BOCK et al 95] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser & D. Fourmaintraux : *Development of a new airborne laser subsidence measurement system, aiming at mm-accuracy*, in Proc. 5th Int. Symp. Land Subsidence, La Haye (NL), Balkema, laboratoire OEMI, IGN SR 950001/L-COM, octobre 1995.

[BOCK et al 96] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser & J. Pelon : *Ranging Performance Evaluation of the Wide-Angle Laser Ranging System*, IEEE Tr. on Geoscience and Remote Sensing, laboratoire OEMI, IGN SR 960009/L-COM, novembre 1996.

[BOCK et al 96] O. Bock, M. Kasser & Ch. Thom : *A Wide Angle Airborne or Spaceborne Laser Ranging Instrumentation for Subsidence Measurement*, Proc. 10th Int. Workshop Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (Chine), laboratoire OEMI, IGN SR 960010/L-COM, novembre 1996.

[BOCK et al 97] O. Bock, M. Kasser Ch. Thom & J. Pelon : *Precise Relative Positioning by Wide - Angle Laser Ranging : First Ground-Based Experimental Results*, IEEE Tr. on Geoscience and Remote Sensing, laboratoire OEMI, IGN SR 970003/L-COM, 1997.

[BOCK et al 97] O. Bock, M. Kasser, Ch. Thom & J. Pelon : *Study of a Wide-Angle Laser Ranging System for Relative Positioning of Ground-Based Benchmarks with Millimeter Accuracy*, in Journal of Geodesy, laboratoire OEMI, IGN SR 970004/L-ART, 1997.

[BOCK et al 97] O. Bock, M. Kasser, Ch. Thom & J. Pelon : *Wide-Angle Airborne Laser Ranging for Precise Relative Positioning : Ground Based Experiments and Aerial Simulations*, Aerospace Remote Sensing / Laser Radar Techniques, Londres (GB), laboratoire OEMI, IGN SR 970005/L-COM, septembre 1997.

[BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser & Ch. Thom : *A Wide - Angle Airborne Laser Ranging System for Millimeter Accuracy Subsidence Measurements*, in Journal of Optics, laboratoire OEMI, IGN SR 980001/L-ART, June 1998.

[BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser & Ch. Thom : *A Wide - Angle Airborne Laser Ranging System for Millimeter Accuracy Subsidence Measurements*, in Proc. EOS Topical Meeting on Optoelectronic Distance / Displacement Measurements and Applications, Nantes (F), laboratoire OEMI, IGN SR 980002/L-COM, juillet 1997.

Base de données géographiques

C.3.1 Placement automatique des toponymes

François Chirié

Contexte

Le placement automatique des toponymes s'inscrit dans la rédaction automatique des cartes : l'IGN produit ses cartes papiers de plus en plus à partir de ses bases de données numériques, ce qui rend possible leur rédaction automatique (ou tout au moins semi-automatique).

Objectif

L'objectif est de placer automatiquement un grand pourcentage des toponymes de façon correcte sur le plan cartographique, le reste étant placé interactivement par un opérateur.

Résultats

Thèse de Mathieu Barrault : placement des noms d'objets linéaires.

Qualité propre des positions

M. Barrault a élaboré des critères de qualité propre et des mesures correspondantes :

- mesure de la courbure et de sa variance le long de la position,
- répartition homogène des écritures répétées,
- conservation de l'écart inter-mots,
- orientation du nom.

M. Barrault a défini une métrique, c'est-à-dire une méthode pour combiner les mesures de qualité ci-dessus au sein d'une position, et pour combiner les qualités respectives des positions des occurrences d'un nom le long d'un objet linéaire. Cette méthode utilise des combinaisons quadratiques : cela permet de préférer une position moyenne pour deux critères à une position bonne pour un critère et mauvaise pour un autre, et de préférer une combinaison de positions moyennes des occurrences d'un nom, à une combinaison d'une position bonne et d'une position mauvaise.

Génération de formes adhérentes à l'objet linéaire

Les noms sont placés le long de ces formes adhérentes. Deux méthodes ont t développées : lissage par fermeture, et reconstruction par courbure. Pour calculer la courbure, M. Barrault a développé une méthode de calcul de convolution originale par rapport à la littérature.

Problème du fond de carte

S'il y a beaucoup de contraintes, c'est-à-dire si la carte est dense, le nombre de positions possibles est très restreint, ce qui n'était pas prévu.

Lors de l'industrialisation, il faudrait donc développer une gestion des blocages, non implémentée dans la version actuelle du programme : placements sur deux lignes, abréviation des noms, transformation d'une mutilation interdite d'un détail de fond de carte en mutilation autorisée, mais avec poids sanctionnant.

Noms d'objets surfaciques

L'approche choisie par B. Hergott et M. Barrault [HERGOTT 97] est la caractérisation de la forme par son squelette. Le programme développé effectue les opérations suivantes :

- filtrer le contour avant squelettisation,
- calculer le squelette,
- épurer le squelette (éliminer les arêtes du squelette inadaptées au placement du nom),
- approcher le squelette par des arcs de cercles.

Le programme actuel donne de bons résultats, mais nécessite des compléments :

- caractérisation des meilleures positions (le programme actuel choisit systématiquement l'arc le plus long), déterminer des critères de qualité et leur combinaison,
- prise en compte de la mutilation du fond de carte, qu'un nom de surface peut gêner (le programme actuel effectue un placement en fonction de la surface considérée isolément),
- variation des inter-mots, fixes dans le programme actuel,
- certaines bases de données IGN ne possèdent pas le contour de certains objets surfaciques, mais uniquement un point central; ce problème relève plus de l'industrialisation.

Agencement global des écritures

Notons que, bien que beaucoup de recherches aient été effectuées à l'étranger sur le placement automatique des toponymes, peu, voire pas, de recherches ont été effectuées sur l'agencement des écritures.

Deux approches ont été étudiées :

Déterminer le graphe de Delaunay des écritures, approchées par un point (stage de C. Duchêne) [DUCHÊNE 97]. Le graphe de Delaunay est calculé à partir des centres des toponymes, et les variances des distances des centres à leurs voisins sont minimisées.

- Premier inconvénient : les écritures ont des tailles différentes, approcher les écritures par un point crée donc un biais.
- Deuxième inconvénient : lenteur du calcul du graphe de Delaunay; mais de nouveaux algorithmes peuvent être testés.

Dilatation des rectangles (M. Barrault)

Les rectangles englobant les écritures sont dilatés bien au delà des emprises respectives des écritures, puis pour chaque couple d'écritures, l'intersection entre leur rectangles est calculée, ce qui fournit une mesure de la proximité des deux écritures.

Comparaison Delaunay - rectangles

La méthode des rectangles engendre seulement des répulsions entre noms, mais ne tient pas compte de la structure des détails nommés de la carte (c'est-à-dire de leur disposition relative). La méthode est donc bonne dans des zones denses en toponymes, où la structure des détails nommés est régulière, ce qui est le cas lorsque la carte est bien généralisée. La régularité contraint la répulsion : les noms sont cernés par d'autres noms, ils sont donc placés au milieu des autres.

Mais si au contraire la structure des noms est irrégulière et comporte des trous, c'est-à-dire des zones sans toponymes, alors la méthode des rectangles met les noms dans les trous; cela entraîne que la structure des noms ne ressemble pas du tout à la structure des détails nommés, ce qui nuit à la qualité cartographique. La structure étant irrégulière, les répulsions sont mal contraintes.

Les noms n'étant pas cernés de façon isotrope par d'autres noms, certains noms sont placés dans des trous. La méthode Delaunay, elle, conserve la particularité de la répartition des détails nommés.

Pour l'intégration avec les autres programmes de placement automatique des toponymes, il y a deux solutions :

- le programme d'agencement valide le résultat des programmes de placement automatique des toponymes, et le réaménage. Il détecte les régions où il n'y a pas assez d'écritures, et propose de mieux les répartir,
- le programme d'agencement est introduit dans ces programmes : la procédure déterminant si deux noms se mutilent, qui renvoie un booléen, serait remplacée par une procédure renvoyant un poids proportionnel à la proximité des deux noms.

Placement des blasons

À la demande du projet Top100, une recherche a été menée pour prendre en compte les blasons lors du placement automatique. Le stagiaire A. Pauthonnier a modifié le programme de placement automatique des noms horizontaux pour qu'il place les blasons et chiffres de population relativement aux noms.

Publications

[BARRAULT 97a] M. Barrault : *Automatisation du positionnement des écritures linéaires*, in Bulletin d'Information de l'IGN, n° 68, 1997.

[BARRAULT 97b] M. Barrault : *An automated system for name placement which complies with cartographic quality criteria : the hydrographic network*, COSIT'97, Pittsburgh, Pennsylvania (USA), in proceedings pp. 499-500, laboratoire COGIT, IGN-SR 970024/S-COM, 1997.

[HERGOTT 97] B. Hergott : *Placement automatique des noms de surfaces*, rapport de stage DESS intelligence artificielle Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 970042/S-STA, septembre 1997.

C.3.2 Base de données multi-échelles

par Cécile Lemarié

Contexte

Actuellement, les bases de données géographiques s'apparentent trop à des cartes, c'est-à-dire à une abstraction particulière du monde réel. Ainsi, elles n'autorisent pas la manipulation ou même le stockage de plusieurs représentations des mêmes données.

L'Institut Géographique National, comme la plupart des agences cartographiques, produit plusieurs bases de données destinées à des utilisations à des échelles différentes, or cette organisation en bases de données sans lien les unes avec les autres, ne permet pas une gestion simple et cohérente des données alors que l'intégration de ces données en une base de données multi-échelles ou multi-représentations permettrait, entre autres, de :

- gérer la cohérence des mises à jour grâce à un mécanisme de propagation de mises à jour d'une représentation à une autre,
- déterminer la qualité des données, en permettant de comparer les différentes représentations d'un même objet,
- dériver des produits à façon correspondant mieux aux besoins des utilisateurs.

Ce besoin en bases de données multi-échelles est aussi exprimé par les utilisateurs qui souhaitent pouvoir naviguer entre des représentations différentes du même objet dans des applications diverses telles que les systèmes de navigation.

Objectif

L'action de recherche Multi-Échelles, commencée en 1995, vient de s'achever. Elle avait donc pour objectif de définir un mécanisme permettant de regrouper dans une même base de données plusieurs représentations des mêmes données afin de permettre une navigation entre les différents niveaux de détails.

Résultats

Alors que l'action de recherche s'était orientée les années passées vers la définition du mécanisme d'intégration de bases de données multi-échelles comprenant une phase de pré-intégration, une phase de déclaration des correspondances et une phase d'intégration, l'année 1997 clôturant l'action de recherche s'est attachée à finaliser la partie théorique du processus d'intégration de bases de données géographiques et à valider les travaux réalisés.

La finalisation du processus d'intégration de bases de données géographiques a porté sur :

- l'achèvement de la taxonomie des conflits : recensant les conflits qui peuvent être rencontrés lors de l'intégration de bases de données géographiques,
- la définition d'une méthode permettant de déclarer les correspondances au niveau du schéma, en se basant sur la méthode d'assertion des correspondances utilisée en bases de données traditionnelles et en l'étendant aux bases de données géographiques,
- la définition pour chaque type de conflit de la méthode d'intégration de schémas à utiliser.

L'ensemble de ces points se trouve formalisé dans la thèse de Thomas Devogele [DEVOGELE 97b].

Une autre partie du travail a consisté à démontrer l'efficacité du processus d'intégration de bases de données multi-échelles avec la constitution d'une base de données multi-échelles mono-représentation issue des données de Géoroute et de la BD TOPO.

Alors que jusqu'à maintenant seule la multi-représentations avait été étudiée le but de cette étude était de fusionner dans une seule base de données les données sémantiques de Géoroute et les données géométriques de la BD TOPO.

Cette étude s'est déroulée en deux étapes : une première étape d'appariement des données [BRANLY 97] une deuxième étape d'intégration [OUSSET 97].

Parallèlement à ces travaux, une étude sur l'appariement (méthode consistant à identifier les données représentant le même phénomène du monde réel dans deux représentations différentes) a été effectuée, elle a consisté à valider certains outils d'appariement en comparant les jeux de données Cadastre et BD TOPO et à définir les premières spécifications d'un module générique d'appariement [LEMARIÉ, BUCAILLE 97], en se basant sur les mécanismes d'appariement utilisés dans l'action de recherche Multi-Échelles.

Suites

Alors que l'action de recherche Multi-Échelles s'achève, ses résultats seront repris dans deux actions de recherche distinctes :

- l'une, sur les "Mécanismes de mise à jour entre bases de données géographiques" qui reprendra les travaux sur l'intégration de base de données multi-échelles pour définir comment propager des mises à jour d'une base de données géographiques à une autre,
- l'autre, sur "l'Appariement" qui reprendra les travaux réalisés sur l'appariement afin de traiter celui-ci d'une façon plus globale (cet outil est utilisé pour faire de la mise à jour, du contrôle qualité) en définissant les algorithmes à utiliser ainsi qu'un processus générique.

Publications

[BRANLY 97] P. Branly : *Mise en place d'un processus d'appariement dans le cadre de l'intégration des bases de données BD TOPO et Géoroute*, CNAM, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, rapport de stage, laboratoire COGIT, IGN-SR 970030/S-STA, juin 1997.

[DEVOGELE 97a] Th. Devogele : *Les SIG multi-représentations : Applications et Systèmes*, Informatique Pour l'Environnement Umweltinformatik'97, Geiger, Jaeschke, Rentz, Simon Spengler, Zilliox Zunder (Eds.), Metropolis, Strasbourg (F), pages 678-687, laboratoire COGIT, IGN-SR 970009/S-COM, 1997.

[DEVOGELE 97b] Th. Devogele : *Processus d'intégration et d'appariement de Bases de Données Géographiques : application à une base de données routières multi-échelles*, rapport de Thèse de Doctorat, Université de Versailles, laboratoire COGIT, IGN-SR 970025/S-THE, décembre 1997.

[DEVOGELE et al 97] Th. Devogele, Ch. Parent & S. Spaccapietra : *On Spatial Database Integration*, Int. Journal GIS, laboratoire COGIT, IGN-SR 970045/S-ART, 1997.

[OUSSET 97] O. Ousset : *Contrôle de cohérence et migration de données géographiques dans une base de données intégrée*, DESS AIST, LIST, Université Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 970036/S-STA, octobre 1997.

[TIMPF, DEVOGELE 97] S. Timpf & Th. Devogele : *New Tools for Multiple Representations*, ICC'97, Stockholm (S), pp. 1381-1386, laboratoire COGIT, IGN-SR 970046/S-COM, 1997.

[LEMARIÉ 97] C. Lemarié : *Étude de l'appariement géométrique Cadastre/BDTopo*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970019/S-RAP, janvier 1997.

[LEMARIÉ, BUCAILLE 97] C. Lemarié & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970026/S-RAP, juillet 1997.

C.3.3 Modélisation base de données géographiques en trois dimensions

Sylvie Lamy

Contexte

La gestion géométrique des bases de données géographiques s'est appuyée sur un modèle topologique en deux dimensions (graphe planaire) aujourd'hui bien maîtrisé.

Cependant, lorsque la géométrie est définie en trois dimensions, la gestion s'effectue avec des limitations : pas de faces verticales, pas de superposition de primitives, pas de relations suivant la verticale, pas de gestion de volume, pas de requêtes associées à la troisième dimension,....

Objectif

L'objectif de cette action de recherche qui a débuté fin 1996 est de concevoir un modèle de bases de données qui gère la troisième dimension, incluant les relations topologiques et spatiales. Ce modèle sera ensuite utilisé pour établir un prototype d'une BD TOPO en trois dimensions.

Activités et résultats

Cette année a été consacrée à l'élaboration d'un modèle tri-dimensionnel. La démarche a été d'étudier les relations topologiques qui existent en deux dimensions (graphe planaire) [SCHOLL et al 96], pour choisir les primitives et les relations 3-D pertinentes. Par la suite, après exploration des différents modèles couramment utilisés en CAO/DAO (modèles volumiques, par frontière et par balayage) [MANTYLA 88] [CAMBRAY 94], le modèle par frontières "Boundary Representation" (BR) a été retenu puis enrichi de primitives et de relations topologiques.

Le modèle élaboré peut donc être vu comme une extension du graphe planaire et du BR.

Extension de BR

- primitives Nœuds, arêtes, Faces et Volumes (primitives du BR classique),
- primitives Trou surfacique et Trou volumique,
- primitives orientées : arcs orientés et faces orientées (pour une gestion du type graphe planaire et pour représenter certains objets géographiques obligatoirement orientés),
- primitives couples (arc orienté, face non orientée). Ces primitives permettent d'avoir une structure similaire à celle utilisée dans certains modèles 2-D.

Extension du graphe planaire

Les relations du graphe planaire se retrouvent dans le modèle tridimensionnel, mais concernent les primitives de dimension immédiatement supérieure. Par exemple, en 2-D, on dispose d'une face à droite et d'une face à gauche d'un arc orienté; en 3-D, pour une face orientée, on a un volume "à droite" (ou du côté de la face orientée) et un volume "gauche" (ou bien du côté de la face orientée inverse). En 2-D, pour un arc orienté, on peut obtenir l'arc orienté suivant avec un nœud final invariant. En 3-D, pour un couple (arc orienté, face non orientée), on peut avoir le couple suivant avec arc orienté invariant. La notion d'arc orienté en 2-D est identique à celle de couple (arc orienté, face non orientée) en 3-D.

Enfin, on attachera une importance toute particulière à des relations directionnelles, non topologiques : les relations suivant la verticale "au-dessus de" et "au-dessous de".

Le modèle géométrique sur lequel s'appuie les différentes primitives topologiques est celui du simplexe [BREUNIG et al 94]. Ce modèle permet de ne pas rencontrer les problèmes avec la géométrie des faces non planes, non convexes, et de faciliter les calculs d'aires.

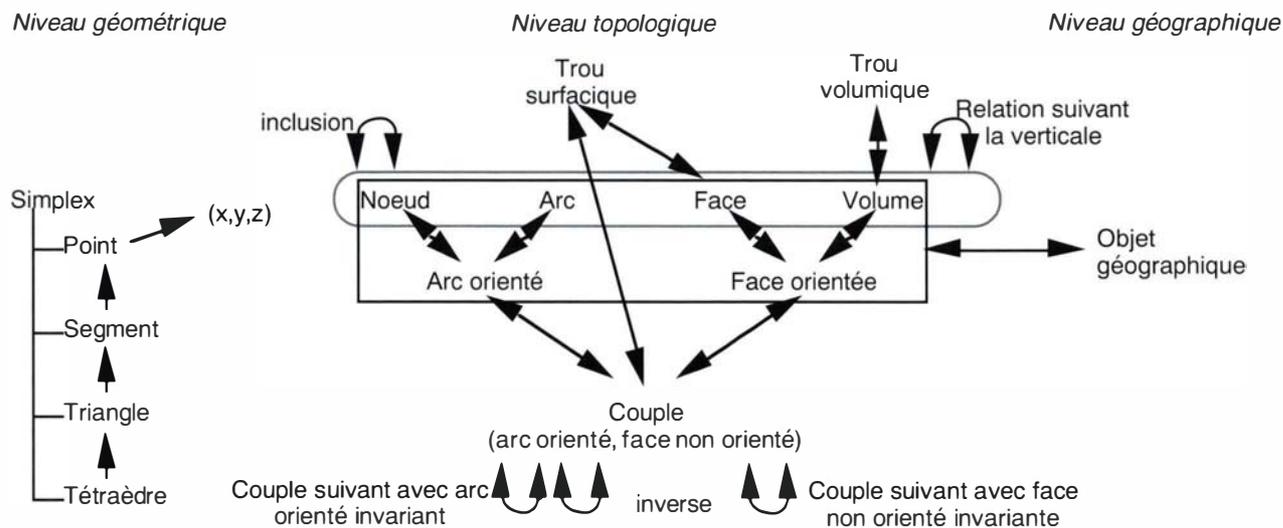


figure C.3.3.1

Suite

Il s'agira de valider ce modèle. En 1998, les classes et les méthodes de Géo₂ seront enrichies pour intégrer le modèle proposé. Une étude des objets géographiques présents dans la BD TOPO en 2-D et 2-D1/2 permettra ensuite de spécifier ces objets en 3-D.

Références

- [BREUNIG et al 94] M. Breunig, Th. Bode & AB. Cremers : *Implementation of elementary geometric database operations for 3D-GIS*, in Proceedings of the 6th International Symposium on Spatial Data Handling 1994, Edinburgh, Scotland, vol. 1, pp 604-617, 1994.
- [CAMBRAY 94] B. de Cambray : *Étude de la modélisation, de la manipulation et de la représentation de l'information spatiale en 3-D dans les bases de données géographiques*, thèse de doctorat de l'Université de Paris-6, soutenue le 24 octobre 1994.

C.3.4 Mécanismes de mise à jour entre bases de données géographiques

par Cécile Lemarié

Contexte

A l'heure où nous commençons à disposer d'un grand nombre de bases de données ayant nécessité de gros investissements, à la fois de la part des producteurs de données et des utilisateurs, la question de la mise à jour semble cruciale, vue l'évolution rapide des données.

L'Institut Géographique National, producteur de bases de données géographiques et des produits cartographiques qui en dérivent, est tenu de maintenir à jour toutes ses productions. Du fait de la complexité du processus de fabrication des produits cartographiques à partir des bases de données, on peut s'interroger sur la démarche à suivre pour mettre à jour ces produits dérivés. En particulier il pourrait être intéressant de réutiliser les mises à jour effectuées sur une base de données pour les reporter sur une autre base : c'est une situation à court terme pour ce qui est de la mise à jour des produits cartographiques (TOP25, TOP100, Plans de Villes). C'est une situation à plus long terme, pour ce qui est de la mise à jour en parallèle d'un ensemble de bases de données, incluant donc la mise au point et la mise à jour d'une base de données multi-échelles, ou la propagation et l'intégration des mises à jour chez un client.

Objectifs

Les objectifs de cette action de recherche qui a débuté en 1997 sont triples :

- spécifier les mécanismes de mises à jour de produits dérivés à partir des mises à jour de leurs bases de données sources, il est nécessaire pour cela d'avoir une classification précise des opérations de mise à jour,
- maîtriser les mises à jour concomitantes de plusieurs bases évoluant indépendamment, notamment d'une base client ayant subi des transformations non contrôlables *a priori* par le fournisseur; des données exogènes pouvant être introduites par le client et compliquer considérablement la propagation des mises à jour,
- mettre au point une base de données multi-échelles permettant, entre autres, d'aider à la réalisation des objectifs ci-dessus. Maîtriser les outils permettant de propager dans cette base multi-échelles les mises à jour par analyse des changements géographiques.

Résultats

Les travaux réalisés en 1997 ont porté sur :

- la définition d'une méthode de détection des mises à jour entre deux versions de la BD CARTO ainsi que la génération d'un journal des mises à jour à apporter à la base "cliente" [BUCAILLE 97], [BADARD 97b],
- le transfert des mises à jour de la BD TOPO vers la TOP25 (base de données dérivée de la BD TOPO ayant pour but de permettre la sortie des cartes TOP25 et série bleue). Cette étude a été découpée en deux parties : la détection des mises à jour entre deux versions de la BD TOPO puis la propagation de ces mises à jour sur la TOP25 issue de la première version de la BD TOPO. La première partie de cette étude a été réalisée sur un jeu test à l'aide de mécanisme d'appariements, la propagation des mises à jour sera réalisée en 1998,
- l'étude des corrélations possibles entre les bases de données géographiques. Le but de cet axe de recherche était de déterminer une typologie des relations liant les entités représentant les phénomènes du monde réel modélisés dans les bases de données, ainsi que les différentes structures des bases elles-mêmes afin d'en déduire comment les mises à jour peuvent se propager entre deux bases de données géographiques. Une approche de cette méthode de propagation et d'intégration des mises à jour a été également définie [BADARD 97a], [BADARD, SPÉRY 97],
- suite aux travaux sur la BD CARTO [BUCAILLE 97] et sur le Cadastre [LEMARIÉ 97] en terme d'appariement, les premières spécifications d'un module générique d'appariement [LEMARIÉ, BUCAILLE 97] ont été définies.

D'autre part, des contacts ont été établis durant cette année avec de nombreux partenaires extérieurs. Un nouveau PSIG du GdR MIS CASSINI a été proposé pour 1997-1999 et un sous-axe sur le thème de la mise à jour a été retenu. La mise en place d'une coopération entre la France (METL, IGN) et le Québec (MRN, Université Laval à Québec) sur l'actualisation des données à référence spatiale est également en cours. Elle vise à confronter les réflexions menées dans les deux pays, à échanger, à mettre en commun certains moyens et à établir des bases tests pour valider

les approches retenues afin de mettre au point un processus générique de propagation et d'intégration des mises à jour dans des bases de données géographiques.

Suites

L'année 1998 devrait porter sur :

- la finalisation du test BD TOPO / BDTOP25 : l'étude commencée sur la propagation des mises à jour BD TOPO vers la BDTOP25 sera achevée. Les mises à jour détectées entre les deux versions BD TOPO dans la première partie de l'étude devront être propagées sur la BDTOP25. L'étude devra montrer quelles sont les mises à jour que l'on peut propager automatiquement et quelles sont celles qui nécessitent une interaction. Enfin il faudra comparer le coût d'une mise à jour par propagation à celui d'une mise à jour " traditionnelle " d'un produit dérivé,
- l'étude de propagation de mises à jour sur des bases dérivées ayant des niveaux conceptuels plus éloignés tels que la BD CARTO d'un côté et les BD Route500 et Million de l'autre,
- la continuation de la thèse de Thierry Badard portant sur la "Propagation des mises à jour dans une base de données multi-représentations par analyse des changements géographiques". L'année 1998 devrait s'orienter vers l'étude de l'évolution des entités dans le temps. Cet axe de recherche se décomposera en l'établissement d'une typologie des différents changements géographiques qui peuvent affecter les phénomènes du monde réel modélisés et une étude des mécanismes existants de gestion d'historique aux seins des bases de données. Parallèlement, les recherches bibliographiques et notamment celles concernant les mécanismes de gestion d'historique vont se poursuivre afin de pouvoir choisir ou adapter l'un d'entre eux pour aider à la résolution de ce problème.

Publications

[BADARD 97a] Th. Badard : *Documentation - Mise à jour de la BD CARTO*, laboratoire COGIT, IGN-SR 9700027/S-MAN, 1997.

[BADARD 97b] Th. Badard : *Étude de la propagation des mises à jour dans une base de données multi-représentations par analyse des changements géographiques*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970023/S-RAP, juillet 1997.

[BADARD, SPÉRY 97] Th. Badard & L. Spéry : *Vers une méthode de propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques*, soumis à la Revue internationale de géomatique, laboratoire COGIT, IGN-SR 970035/S-ART, 1997.

[BUCAILLE 97] O. Bucaille : *Mise à jour d'une Base de Données Géographiques - Exemple de la BD CARTO à l'Institut Géographique National*, mémoire d'Ingénieur CNAM en "Bases de Données Avancées", laboratoire COGIT, IGN-SR 970002/S-STA, février 1997.

[LEMARIÉ 97] C. Lemarié : *Étude de l'appariement géométrique Cadastre/BDTOPO*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970019/S-RAP, janvier 1997.

[LEMARIÉ, BUCAILLE 97] C. Lemarié & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970026/S-RAP, juillet 1997.

C.3.5 Recherche sur la qualité des données géographiques

François Vauglin

Contexte - objectifs

La nouvelle action de recherche sur la Qualité des Données Géographiques a été définie pour une durée de deux ans. Elle a débuté en 1997. Son objectif est l'évaluation de la pertinence des métadonnées sur la qualité des données géographiques. En particulier, il s'agit de mettre à l'épreuve, du point de vue des utilisateurs, l'intérêt et l'utilité des indicateurs de qualité tels que proposés dans les normes en cours de définition (CEN au niveau européen, ISO au niveau international). Ces travaux s'inscrivent dans le contexte de la recherche sur la qualité des données qui s'est intensément développée au niveau international ces dernières décennies, et au niveau national ces dernières années.

L'information géographique numérique est accompagnée de métadonnées décrivant sa qualité. Ces métadonnées, telles que décrites dans le Bulletin d'Information de l'IGN n° 67, sont fort utiles pour le producteur qui doit s'assurer que les données produites sont conformes aux objectifs. Les utilisateurs de données qui ont besoin d'estimer la qualité des résultats qu'ils déduisent des bases de données géographiques, peuvent avoir accès à ces mêmes métadonnées, sans que le mode d'emploi de ces informations ne soit donné. Ceci implique que l'utilisateur a des informations qu'il ne sait pas forcément interpréter ni manipuler, notamment pour évaluer les résultats qu'il tire des données géographiques. Le but de cet axe est de chercher à fournir de sens les informations proposées, et d'évaluer la pertinence de celles-ci.

Dans cette action de recherche, les composantes sémantiques, géométriques, et de cohérence logique sont l'objet d'un effort particulier. La qualité géométrique a été relativement plus étudiée que les autres composantes de la qualité car on peut plus facilement la formaliser d'un point de vue mathématique.

L'étude de la cohérence logique doit permettre de maîtriser la transmission implicite de la topologie, sans qu'il soit nécessaire de la décrire entièrement. Enfin, une meilleure compréhension du comportement de la qualité sémantique répondrait à une forte attente des utilisateurs, mais aussi des producteurs.

Cette nouvelle action de recherche est définie en continuité avec l'ancienne, qui était centrée sur la qualité géométrique; elle en reprend l'état d'esprit tout en se développant sur l'ensemble des composantes de la qualité.

Activités - résultats

Pour l'année 1997, l'étude a porté en priorité sur la pertinence des indicateurs de qualité, notamment au regard des besoins des utilisateurs. La mise en route de ce travail nécessite au préalable qu'on dispose de jeux de données adaptés à des tests, et d'outils manipulant les indicateurs. Pour connaître la pertinence des indicateurs, ces outils doivent permettre d'évaluer la relation entre les indicateurs et les résultats issus des applications des utilisateurs, notamment la qualité de ces résultats. L'idéal serait de pouvoir construire le lien entre les indicateurs de la qualité des jeux de données et des indicateurs de la qualité des résultats issus des mêmes données.

La constitution d'un outil préalable permettant de manipuler les indicateurs a été l'effort majeur de l'année 1997, ce qui a donné lieu à la constitution d'un ensemble d'applications. Pour évaluer des indicateurs de qualité, rappelons qu'il faut disposer d'une estimation du terrain nominal. Celle-ci prend souvent la forme d'un jeu de données plus précis. Les indicateurs de qualité évaluent la qualité interne des jeux de données, ils sont donc accessibles en pratique par des mesures entre les données plus précises et les données à estimer. C'est pourquoi l'appariement entre ces deux types de données doit être réalisé. L'outil correspondant a déjà été développé dans l'environnement de Géo₂ pour les objets linéaires, le cas ponctuel étant inclus.

Un outil d'appariement géométrique pour les données surfaciques a fait l'objet d'une étude poussée. Ce point est détaillé plus bas. Disposant d'un jeu de données apparié à un jeu de référence, les indicateurs peuvent alors être évalués.

L'implémentation correspondante a été faite pour un certain nombre de nouveaux indicateurs portant sur la géométrie et sur la cohérence logique. Pour l'instant, l'implémentation de l'évaluation des indicateurs classiques n'est pas faite, car nous utilisons ceux qui sont fournis par la cellule recette ou les équipes de contrôle qualité de l'IGN sur les jeux de données vérifiés.

Supposant les indicateurs de qualité disponibles, ainsi que les jeux de données et de référence, l'étude de la pertinence des indicateurs passe par l'étude de leur sensibilité à la qualité des données. Dans ce but, une démarche statistique a été mise en œuvre : un bruitage connu vient entacher les données, ce qui induit des bruits dans les indicateurs. La corrélation de ce bruit au bruit introduit permet de connaître la sensibilité des indicateurs aux incertitudes des données. Le bruitage correspondant peut être fait selon deux techniques : lorsqu'un modèle d'erreur est disponible, le bruitage peut respecter celui-ci, ce qui permet d'avoir des données bruitées qui respectent les spécificités des données géographiques (forme des objets, types d'erreurs, autocorrélations). La technique alternative, utilisable dans tous les cas, est d'introduire un bruitage arbitraire (en pratique, uniforme), ce qui permet une étude mathématique de la propagation des incertitudes plus facile. Des versions rudimentaires de ces types de bruitages ont été implémentées.

La définition de l'action de recherche présente était résolument tournée vers les besoins des utilisateurs, notamment sur l'utilisation qu'ils peuvent faire des indicateurs de qualité dans leurs applications. Dans ce but, une application particulière a été sélectionnée : le calcul d'itinéraires à partir de données Géoroute. Un logiciel tenant compte des attributs disponibles dans la base de données a été réalisé en C++ dans Géo₂, avec un module de calcul d'isochrones. Les différents résultats obtenus en fonction des deux types de bruitages présentés ci-dessus sont en cours d'exploitation statistique, pour chercher à comprendre quels indicateurs sont pertinents au regard de cette application, et comment la connaissance de leur valeur peut permettre de déduire la fiabilité du résultat. Les premières conclusions seront disponibles début 1998.

Un certain nombre d'ouvertures possibles étaient proposées dans la rédaction de l'action de recherche 1997 dans le but de les traiter selon les disponibilités et les compétences présentes. Quelques unes de ces propositions ont été étudiées.

La thèse de F. Vauglin, soutenue en avril 1997, proposait des modèles et leur propagation pour les incertitudes géométriques du linéaire. Les questions liées à l'automatisation de l'évaluation de modèles pour les incertitudes géométriques linéaires ont été traitées en grande partie cette thèse, ainsi qu'un travail préliminaire sur les simulations d'erreurs.

Un travail analogue reste à faire pour la modélisation des incertitudes géométriques des données surfaciques, ce qui a été commencé cette année lors d'un stage de DEA. L'étude a permis de définir une méthode robuste d'appariement géométrique surfacique (1:n et n:1) reposant sur deux paramètres librement fixés par l'utilisateur. Cette étude s'est poursuivie sur les indicateurs de précision géométrique surfacique. Un certain nombre de nouveaux indicateurs ont été proposés.

Le travail de veille sur la recherche sur la superposition a été entretenu, en particulier par les articles rédigés en commun avec le chercheur américain Francis Harvey de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, Suisse).

Perspectives

Une meilleure connaissance de la pertinence des indicateurs de qualité reste l'objectif à terme de cette action de recherche, définie initialement sur deux ans. Ceci implique notamment qu'il faut donner du sens aux métadonnées sur la qualité pour qu'elles deviennent lisibles pour les applications des utilisateurs.

Pour mener à bien ces recherches, deux approches restent possibles : travailler sur les opérations de base des applications des SIG pour étudier la modification des indicateurs à travers les applications; ou considérer les applications comme une boîte noire et examiner la dépendance statistique des résultats et de leur qualité en fonction de la qualité des données. Cette dernière solution est privilégiée pour pouvoir étudier une application dans sa globalité malgré le temps limité disponible.

L'application testée en 1997 était une application de calcul d'itinéraire routier; l'estimation de la qualité des données d'un produit dérivé d'une base de données dont la qualité est connue sera l'application étudiée en 1998. Les enjeux de ce type d'application sont évidents pour le producteur de données, car il doit lui permettre d'éviter une multiplication des contrôles qualité, mais ils le sont aussi pour l'utilisateur qui modifie, extrait des données de la base, ou les enrichit avec ses propres données. Ces études bénéficient d'une collaboration avec une spécialiste américaine du domaine, S. McMaster.

Cette action restant placée dans la perspective des travaux sur la normalisation de la qualité des métadonnées, les indicateurs étudiés dans l'action de recherche sont issus des normes en projet. Ceci doit permettre à l'utilisateur de savoir utiliser les métadonnées sur la qualité. Les limites de ce qu'il est possible de tirer de ces informations seront l'objet d'une attention particulière, et des propositions alternatives seront recherchées lorsque les métadonnées prévues sont insuffisantes - indicateurs de qualité surfacique, de qualité esthétique, de qualité topologique, de cohérence logique, ou même de qualité sémantique dans certains cas.

La redondance de certains indicateurs ou des interconnexions existantes entre les différentes composantes de la qualité pourra être étudiée dans ce cadre. De même, les besoins des utilisateurs devront conduire à définir une pondération des indicateurs en fonction de leur importance.

Un effort sera fait pour étudier l'homogénéité et la représentativité des indicateurs. Telle que présentée dans les normes, leur évaluation ne dépend pas de la répartition des données. Ils sont déduits de mesures faites sur des échantillons de données et leur validité pour l'ensemble du jeu n'est pas abordée. Ce point fondamental, pour lequel une étude de fond est à faire, soulève les délicats problèmes de la régionalisation de la qualité de l'information géographique numérique, des échantillonnages, et des sondages.

Un constat analogue peut être fait sur la corrélation des problèmes de qualité des données : il est difficile de fournir des indicateurs de qualité représentatifs sans connaître la structure de corrélation des grandeurs mesurées. De plus, cette connaissance permet de faire des bruitages réalistes pour l'étude de la sensibilité des indicateurs, ou encore de mieux maîtriser les problèmes liés aux partages automatiques de géométrie entre classes ou thèmes. L'étude des rapports entre la précision géométrique relative et absolue se place dans ce cadre.

Ces questions, aux conséquences importantes sur le coût des contrôles et sur la validité des métadonnées transmises aux utilisateurs, pourront être traitées dans le cadre d'une thèse, qui a démarré le 1er octobre 1997.

En fonction des ressources disponibles, notamment en matière de stagiaires, il sera possible de traiter tout ou partie des questions liées à l'action de recherche. Les points précédents seront abordés en priorité. Les points suivants sont fournis à titre indicatif.

Une étude sur la qualité géométrique des données surfaciques a été faite lors d'un stage de DEA SIG. Une thèse pourrait voir le jour sur ce sujet.

Le travail de veille sur la superposition pourra être poursuivi avec les équipes étrangères habituelles. Il pourra être valorisé à l'occasion du lancement de la thèse sur l'appariement, objet d'une autre action de recherche du laboratoire COGIT (Action de recherche sur l'Appariement).

Publications

[ZEROUAL, SAIDI 97] I. Zeroual & Saidi : *Approche méthodologique pour l'évaluation de la qualité dans une base de données géographiques numérique*, rapport de stage, laboratoire COGIT, Centre National des Techniques Spatiales (CNTS), IGN-SR 970018/S-STA, janvier 1997.

[BEL HADJ ALI 97] A. Bel Hadj Ali : *Appariement géométrique des objets géographiques et étude des indicateurs de qualité*, stage de DEA SIG de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 970010/S-STA, 18 septembre 1997.

[HARVEY, VAUGLIN 97] F. Harvey & F. Vauglin : *No fuzzy creep! A clustering algorithm for controlling arbitrary node movement.*, Auto-Carto 13, technical paper, ACSM ASPRS, Annual convention, vol. 5, pp. 317-326. Seattle (WA, USA), 7-10 avril 1997, IGN-SR 970029/S-COM, 1997.

[VAUGLIN 97] F. Vauglin : *Modèles statistiques des imprécisions géométriques des objets géographiques linéaires*, thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 970021/S-THE, soutenue le 21 avril 1997.

C.3.6 Interopérabilité

François Chirié

Contexte

L'interopérabilité des SIG peut être définie par la possibilité, pour n'importe quel utilisateur, d'utiliser n'importe quelles données géographiques, avec n'importe quels traitements, données et traitements situés n'importe où et accessibles *via* un réseau, par exemple Internet.

Un sous-problème important de l'interopérabilité est donc l'accès à un SIG *via* Internet.

Objectif

L'objectif est d'effectuer des recherches en interopérabilité des données et interopérabilité des traitements, relativement aux besoins de l'IGN [LAMY, SALGÉ 97], et d'effectuer parallèlement un état de l'art et une veille sur les nombreuses recherches menées à l'extérieur de l'IGN sur l'interopérabilité.

Suites

En 1997, cet état de l'art a été commencé :

Première approche des travaux de l'OGC

OGC ("OpenGIS Consortium") est un consortium nord-américain d'acteurs de l'information géographique, regroupant notamment les éditeurs américains de SIG, dont le but est de développer "OpenGIS", une norme pour l'interopérabilité des SIG.

Selon OpenGIS, les moyens pour atteindre l'interopérabilité sont l'unification des modèles de données géographiques, et l'unification des services de traitement de données géographiques [OGIS 96a].

OpenGIS compte unifier les modèles en *formalisant* la façon dont on doit *modéliser* le monde réel [OGIS 96b].

L'unification des services sera atteinte en *spécifiant* les *interfaces* des services, c'est-à-dire en définissant leur comportement : vocabulaire, syntaxe, et protocole de la requête envoyée au service et de sa réponse.

En d'autres termes, il faut définir la façon dont le logiciel répond à des stimuli (qui sont des événements) en générant des réponses (qui sont aussi des événements).

Analyse des travaux de l'ISO TC211 sur les opérateurs spatiaux

Le TC 211 est le comité technique de l'ISO chargé d'élaborer des normes concernant l'information géographique.

Un opérateur spatial est une fonction ou procédure qui utilise ou crée des objets spatiaux, utilisation ou création signifiant accès, requête, gestion et traitement.

La norme "Spatial Operators" [ISO/TC211 96b] doit réaliser une taxonomie des opérateurs spatiaux, puis une norme pour leur définition et leur implémentation. Le but de cette norme est de définir les opérateurs spatiaux sans ambiguïté, pour que les diverses implémentations produisent les mêmes résultats, et de définir une algèbre des opérateurs pour pouvoir les combiner. Cette norme se préoccupe donc de l'interopérabilité des opérateurs spatiaux.

Analyse des travaux de l'ISO TC211 sur les "services géospatiaux"

Le but de ce sujet [ISO/TC211 96a] est d'identifier, définir, normaliser les interfaces des services utilisés pour l'information géographique.

L'utilité est double :

- de nombreuses applications pourront accéder à et utiliser de l'information géographique,
- les services normalisés pourront être utilisés pour toute information géographique.

L'interopérabilité entre deux composants est ici définie par la possibilité pour le premier composant d'envoyer des requêtes de services au deuxième composant, et d'en recevoir une réponse.

Test du SIG GeoMedia

Ce nouveau SIG met en œuvre de nouveaux concepts de nature à favoriser l'interopérabilité, et qui seront peut-être repris par les autres SIG du marché :

- décomposition du SIG en "briques" OLE correspondant aux fonctionnalités, accessibles dans n'importe quel outil de développement pour OLE,
- OLE est une technologie orientée objet de Microsoft permettant à une application d'utiliser facilement les fonctionnalités d'autres applications, ce qui ouvre la voie à l'intégration de quantité de logiciels.

À long terme, si les constructeurs de SIG s'entendent pour rendre leurs briques respectives interopérables (par conversion de formats entre briques, ou par des formats communs), ce concept pourrait permettre à chacun de développer son SIG personnalisé, en croisant des fonctionnalités de divers SIG.

Concept de serveur de données OLE

La méthode traditionnelle pour consulter dans un SIG 1 un lot de données d'un SIG 2, par exemple Arc/Info, est d'exécuter une traduction batch du lot de données Arc/Info vers un nouveau lot de données dans le format du SIG 1. Si le lot Arc/Info est mis à jour, il faut recommencer l'opération.

Un "serveur de données Arc/Info pour GeoMedia" ne crée pas dans GeoMedia un nouveau lot de données GeoMedia visible et géré par l'utilisateur, mais il en crée un de façon temporaire et invisible par l'utilisateur.

L'utilisateur peut facilement consulter un lot Arc/Info dans GeoMedia : il suffit qu'il réalise un lien OLE entre GeoMedia, le serveur de données Arc/Info pour GeoMedia, et le lot Arc/Info, sans se préoccuper d'exécuter une traduction ni de gérer la mise à jour (gérée par le lien OLE).

Ce concept de serveur de données favorise donc l'interopérabilité des données. Cela dit, ce dispositif impliquant une traduction en un lot de données temporaire, il risque d'être peu pratique avec les lots volumineux.

Lancement de la thèse de Bénédicte Schietecatte

Le développement de réseaux largement distribués, comme Internet, va de pair avec leur utilisation par les producteurs de bases de données diverses pour la diffusion de leurs contenus. Cela confronte l'IGN au problème suivant : comment pouvons-nous faciliter l'accès de communautés différentes à l'information contenue dans nos bases de données ? Ce problème est inclus dans une problématique plus large, celle de "l'interopérabilité sémantique".

Dans le domaine de l'information géographique, l'interopérabilité peut aussi être définie comme un fonctionnement idéal entre les différents acteurs et systèmes utilisant cette information : un fonctionnement où aucun obstacle technique ou sémantique ne s'opposerait à l'échange de données, de savoir-faire, de traitements.

Comme le montrent les paragraphes précédents, cela est l'objet de nombreuses démarches privées ou institutionnelles. Ainsi, le consortium OGC de vendeurs de logiciels veut mettre en place une interopérabilité entre systèmes d'information géographique (SIG).

Les standards de formats de données géographiques sont également développés en vue de l'échange de données numériques. D'autres démarches étudient la possibilité d'introduire un niveau supplémentaire de description de l'information géographique.

Au sein du laboratoire COGIT, la thèse de B. Schietecatte a débuté en novembre 1997 sur ces modes de description de l'information. Ils devront permettre d'assurer une bonne compréhension du contenu de nos bases et de leur aptitude à répondre à des besoins d'utilisateurs.

Références

[OGIS 96a] *The OpenGIS guide, Introduction to interoperable geoprocessing. The OpenGIS Consortium.* <http://www.opengis.org/techno/guide.htm>, OGIS TC Document 96-001.

[OGIS 96b] *OpenGIS abstract specifications*, The OpenGIS Consortium. <http://www.opengis.org/techno/specs.htm>, OpenGIS Project Document 96-015.

[ISO/TC211 96a] *Geographic information, services*, Document ISO/TC211/N 281, WD 15046-19, 23 octobre 1996.

[ISO/TC211 96b] *Geographic information, Spatial operators*, Document ISO/TC211/WG2 N031, WD 15046-20 N 298. 10 décembre 1996.

Publication

[LAMY, SALGÉ 97] S. Lamy & F. Salgé : *Besoin d'interopérabilité en cartographie automatique*, 18th ICA/ACI International Cartographic Conference ICC 97, in Proceedings, pp.1674-1681, laboratoire COGIT, IGN-SR 970047/S-COM, 1997.

C.3.7 Généralisation du linéaire : une approche nouvelle

Jean-Georges Affholder

Résumé

On évoque ici une approche nouvelle de la généralisation du linéaire routier, qui consiste à partir de la numérisation d'un échantillonnage représentatif de la couverture cartographique de la France à différentes échelles.

Ce n'est plus le cartographe, mais la machine, qui essaye de détecter des règles de généralisation, notamment dans les cas qui jusqu'à présent ont résisté à la formalisation. Cette approche implique une modélisation du linéaire : c'est à cet aspect de la question qu'est consacrée la plus grande partie de cette étude.

On s'attache ici au problème de la généralisation d'un arc isolé, indépendamment de tout conflit avec les autres objets cartographiques.

Hypothèses de base

Un arc de routier, ou plus précisément la polygonale issue d'un scannage et d'une squelettisation qui lui est associée, peut être décomposé en *tronçons*, le tronçon étant, pour l'échelle de départ (tronçon initial), la plus petite partie de l'arc dont la généralisation puisse être envisagée indépendamment du reste de l'arc (cas particulier du problème de la segmentation), et pour les autres échelles, l'homologue d'un tronçon initial, i.e. le résultat de la généralisation de ce tronçon (tronçon final) :

- chaque tronçon peut être décomposé en une séquence de *formes élémentaires* associées à un *facteur d'homothétie* l'association d'une forme élémentaire et d'un facteur d'homothétie constituant un *objet élémentaire*,
- le nombre de formes élémentaires que l'on peut rencontrer pour une échelle donnée est limité,
- on aura constitué des bibliothèques de formes élémentaires à partir respectivement d'un échantillon significatif de la BD CARTO et du résultat du traitement (scannage, vectorisation) des portions correspondantes du 1 : 100 000 et du 1 : 250 000,
- on aura constitué de même des bibliothèques de séquences types, correspondant au même échantillonnage, et constituées des descriptifs des tronçons,
- pour tout nouveau tronçon que l'on voudra généraliser, on recherchera dans la bibliothèque celui qui, à l'échelle initiale, en est le plus proche (tronçon de référence), ce qui implique que l'on ait défini la notion de séquences voisines et, plus généralement, que l'on ait formalisé la ressemblance entre deux séquences. Le tronçon homologue à l'échelle finale constituera une solution approchée de notre problème,
- on aura dégagé des lois permettant de déduire, de la comparaison entre le tronçon à généraliser et le tronçon de référence, des algorithmes de passage de la solution approchée à la solution définitive.

La notion de forme élémentaire

La décomposition d'une polygonale en formes élémentaires pose un problème d'une part de *segmentation*, d'autre part de *modélisation* :

- pour segmenter les tronçons, nous avons choisi les points d'inflexion (PIs) : une forme élémentaire correspondra donc à une portion de polygonale comprise entre deux PIs. Il s'agit certes d'un choix que l'on peut contester : ne vaudrait-il pas mieux découper davantage les polygonales, en faisant intervenir à la fois les PIs et les sommets (points de courbure maximum) ? On diminuerait le nombre total de formes (en augmentant le nombre de formes par tronçon). En fait, un pareil choix ne se réduit pas au choix entre le découpage en virages et le découpage en demi-virages : les tests montrent qu'entre deux PIs on a fréquemment plus d'un sommet (avec les algorithmes que nous avons choisis et sur lesquels nous revenons ci-dessous, jusqu'à quatre ou cinq, dans certains cas),
- concernant le deuxième point, aux implications sans doute bien plus importantes, plusieurs possibilités peuvent être envisagées. Dans l'état actuel de nos travaux, chacun de ces trois types de modélisation, sans compter la simple représentation vectorielle, - que nous appellerons respectivement *matricielle*, *analytique*, et *par l'enveloppe* - intervient à un moment donné du processus,

- la première correspond à une approche purement numérique : deux formes sont considérées comme distinctes si leurs représentations matricielles diffèrent,
- la deuxième modélisation définit les formes par des paramètres géométriques. Nous sommes arrivés à une représentation par *segments de droite*, *arcs de cercle* et *cubiques* qui, d'après nos tests et nos travaux sur la généralisation de la notion de rayon de courbure à une polygonale, semble convenir à la quasi totalité des exemples rencontrés,
- la troisième utilise les extrema locaux de x et de y dans le système local : la forme élémentaire est assimilée à une polygonale ne comportant que des angles droits, et que l'on pourra donc définir par le nombre de côtés et la longueur (normalisée) de chacun

La constitution des bibliothèques de formes élémentaires et de séquences types

Chaque polygonale issue des échantillonnages évoqués au début est transformée en un arc équiréparti auquel on applique un léger lissage gaussien suivi d'une correction de Lowe, le tout destiné essentiellement à éliminer les effets de la numérisation. Sur ce nouvel arc nous définissons des points d'inflexion (PIs) et des points de maximum local de courbure (sommets). On appellera objet élémentaire toute séquence limitée chacun par deux PIs.

Un objet élémentaire générera une forme élémentaire si sa représentation matricielle (ou, ce qui revient au même, sa représentation en code de Freeman), une fois qu'il a été ramené à la longueur unité, diffère de celle de toutes les formes déjà stockées.

On aboutira ainsi à une bibliothèque où les formes élémentaires seront représentées sous forme à la fois matricielle et vectorielle, mais correspondant de toute façon à l'approche purement numérique évoquée plus haut (Remarque : dans la réalité, nous procédons assez différemment, sans quoi nous risquerions de prendre en compte des détails non significatifs d'objets de petite dimension, et inversement, de sacrifier des détails significatifs d'objets de grandes dimensions).

D'après nos essais, on devrait arriver assez rapidement (c'est-à-dire après n'avoir traité qu'une faible partie de l'échantillonnage) à un moment où l'on ne trouve plus de nouvelles formes. On pourra alors passer à la constitution de bibliothèques de séquences types appariées : chaque tronçon à l'échelle initiale qui possède un homologue à l'une au moins des échelles finales sera représenté par une séquence de type $k_i u_i$, appariée à des séquences de type $k_j v_j$, les k_i , k_j étant des facteurs d'homothétie et les u_i , v_j des références à des formes élémentaires.

La décomposition des tronçons à généraliser

Il ne s'agit plus de travailler sur les arcs ayant servi à constituer les bibliothèques des formes élémentaires aux différentes échelles, mais sur des arcs nouveaux. Un arc à généraliser ayant été décomposé en tronçons, chaque tronçon sera décomposé en une séquence de type $k_i u_i$ comme lors de la constitution de bibliothèques.

Il s'agira alors de rechercher une (ou des) séquence qui lui ressemble dans la bibliothèque des séquences type. C'est ici (problème de la notion de séquence voisine et du passage de la solution approchée à la solution définitive) qu'interviendra la modélisation analytique.

C.3.8 Généralisation du réseau

Emmanuel Fritsch

Contexte

Cette action de recherche a pris la suite en 1997 de l'action de recherche "Algorithme de Généralisation", qui visait à mettre en place des opérations élémentaires pour la généralisation d'objets linéaires indépendamment de leur contexte. En effet, la complexité de l'automatisation de la généralisation avait amené à décomposer la généralisation en un corpus d'opérations élémentaires pour chacune desquelles il fallait rechercher une solution algorithmique. Les opérations élémentaires s'appliquent à des objets isolés de leur contexte, et l'on parle alors de généralisation indépendante.

Une fois mis en place ces différents algorithmes élémentaires, il est normal de vouloir prendre en compte des impératifs cartographiques plus complexes. Dans ce cadre, la généralisation de réseau est un objectif intéressant, puisque nécessitant l'examen de plusieurs objets en même temps, mais se limitant pour le moment à une seule couche.

Parallèlement au développement d'algorithmes élémentaires, l'action de recherche "Généralisation du Réseau" a vu le développement d'une approche holiste de la généralisation, basée sur une analogie mécanique : il s'agit de

traduire les contraintes cartographiques sous forme de forces, puis de laisser le système évoluer vers un état d'équilibre.

Objectif

Les recherches précédentes avaient révélé l'absence d'algorithme pour la réalisation de plusieurs opérations de généralisation. Ainsi plusieurs algorithmes de caricature ont-ils vu le jour au laboratoire COGIT : "Accordéon", "Plâtre", suppression de virage, algorithme de Lowe modifié, etc. Parallèlement, des améliorations ont été apportées à quelques algorithmes de la littérature, eux aussi implémentés sur PlaGe. Citons l'algorithme de Douglas et Peucker, dont on s'est attaché à gommer les défauts : atténuation des trop fortes angularités, et recalage des sommets de virage vers leur position nominale.

Enfin, quelques aspects de la généralisation de réseau ont été abordés, lors de stages effectués au cours des deux dernières années. Le passage de la généralisation indépendante (sur des objets isolés) à la généralisation d'un réseau pose de nombreux problèmes de contexte. Les opérations que l'on vise sont, d'une part, la gestion des sélections et éliminations en vue d'alléger le réseau en lui conservant ses propriétés de desserte, et d'autre part, les modifications géométriques nécessaires à la lisibilité de chaque objet.

Un autre stage, achevé en décembre 1997 [REYNES 97], portait sur la sélection d'un réseau de routes en s'appuyant sur des critères de plus court chemin dans le graphe généralisé (entre points spécifiques sur le graphe).

Par ailleurs, une approche mécanique de la généralisation a été proposée. Elle consiste à traiter les objets cartographiques comme des éléments mécaniques interagissant les uns sur les autres, selon différents modes d'interactions modélisant les différents impératifs cartographiques. Cette approche permet d'intégrer de façon concurrente plusieurs règles de rédaction cartographique. Elle se distingue donc de l'approche classique, plus rigide, dans laquelle les opérations utilisées permettent de régler certains conflits, mais en induisent souvent de nouveaux.

Cette approche mécanique a été développée selon deux axes : d'une part, avec la prise en compte de plusieurs contraintes, par un schéma de déplacements itératifs, proche d'une modélisation multi-agents [BAEJS et al 95]. D'autre part, un stage a donné lieu à l'implémentation d'une méthode numérique directe dans le calcul des déplacements, mais le jeu de contraintes retenues est pour le moment insuffisant [KYNDT 97].

Enfin, dans le cadre de cette action de recherche, la thèse d'Emmanuel Fritsch est arrivée à son terme, et a été soutenue en décembre 1997. Signalons que ces travaux vont de paire avec l'action de recherche GPLAT de prototype de généralisation, et que l'on peut donc se référer utilement au compte rendu de cette action.

Suite

Le travail de l'année 1998 sera marqué par l'intégration de nouvelles contraintes cartographiques aux algorithmes déjà développés. Cette intégration devrait concerner aussi bien l'amélioration de l'approche mécanique, en lien avec le projet Agent, que le développement des opérations classiques.

Le passage de l'élément linéaire isolé à un réseau routier ramifié pose de nouveaux problèmes de superposition. En effet, de même qu'un objet linéaire habillé d'un symbole large peut se recouvrir lui-même, il peut aussi recouvrir les objets voisins. S'inspirant des travaux de [NICKERSON 88], un stage (réalisé par Vinciane Unger) a déjà développé des algorithmes de déplacement. Cet algorithme doit être amélioré.

Nous nous pencherons aussi plus attentivement sur les problèmes de carrefours, pour lesquels la largeur du symbole peut induire des défauts perceptuels sur la position apparente du centre du carrefour.

D'autre part, les réseaux posent des problèmes de généralisation spécifiques. En effet, l'opération de sélection qui semble moins compliquée à programmer que les opérations de modification géométrique (le résultat d'une sélection est binaire, accepté ou rejeté) présente une bien plus grande sensibilité au contexte. Pour le réseau routier en particulier, la sémantique du réseau est déterminante : les arcs routiers sont maintenus ou supprimés en fonction de critères variés. Outre la classe de la route, on peut citer la densité de voie de circulation dans la zone et l'importance de la desserte.

Une solution abordée lors d'un stage en 1996 reposait sur l'utilisation de techniques multi-agents pour modéliser des flux circulatoires [MORISSET, RUAS 97]. Ce modèle permet d'affecter à chaque tronçon une valeur quant à son importance du point de vue de la fonction de desserte. Cette fonction de desserte est analysée au niveau du bâti, pour une utilisation à partir de la BD TOPO. Nous nous proposons de reprendre ces travaux en les simplifiant afin de les rendre plus directement utilisables, et adaptés à la BD CARTO, avec une desserte considérée au niveau de l'agglomération.

D'autre part, le problème du maintien de la densité d'information dans le processus de sélection / élimination fera l'objet d'un stage.

Références

[BAEJS et al 95] C. Baeijs, Y. Demazeau & L. Alvares : *Application des Systèmes Multi-Agents à la Généralisation Cartographique*, IGN, 1995.

[KYNDT] J. Kyndt : *Modèle mécanique de la généralisation*, mémoire de DESS, Mathématiques appliquées, Université de Paris-6.

[MORISSET, RUAS 97] B. Morisset & A. Ruas : *Sélection du routier par une approche multi-agents*, ACI'97, 22-28 juin 1997, Stockholm (S), laboratoire COGIT, IGN-SR 970005/S-COM, 1997.

[NICKERSON 88] B. Nickerson : *Automated cartographic generalization for linear features*, in *Cartographica*, vol. 25, n° 3, p 15-66, 1988.

[REYNES 97] J.L. Reynes : *Sélection du réseau routier en vue de sa généralisation*, DESS Application de l'informatique aux sciences de la terre, Université Pierre et Marie Curie, laboratoire COGIT, IGN-SR 970043/S-STA, 1997.

[UNGER 96] V. Unger : *Outils d'assistance au déplacement d'éléments linéaires pour une maquette de généralisation*, DESS d'Application de l'Informatique aux Sciences de la Terre, Université P. & M. Curie, laboratoire COGIT, IGN-SR 960035/S-STA, octobre 1996.

Publications

[FRITSCH 97] E. Fritsch : *Modélisation du linéaire pour le développement d'algorithmes de généralisation du routier*, rapport de thèse, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 970008/S-THE, soutenue le 12 décembre 1997.

FRITSCH 97] E. Fritsch : *Caricature des virages par lissage de la courbure*, in *Bulletin d'Information de l'IGN n° 68*, La recherche en 1996, laboratoire COGIT, 1997.

C.3.9 Généralisation contextuelle

Anne Ruas

Contexte

La généralisation est le processus permettant de dériver d'une base de données géographique à une autre base simplifiée et/ou une carte à une échelle plus petite. Le laboratoire COGIT travaille depuis 1991 dans ce domaine, en collaboration avec d'autres universités. Le laboratoire COGIT participe également à des groupes de travail européens (OEEPE), internationaux (ACI) et sur un projet ESPRIT, en collaboration avec Laser-Scan, les universités de Zurich, Grenoble et Edimbourg.

Dès 1992, les recherches ont été divisées en deux parties : la généralisation indépendante qui concerne avant tout le réseau routier (voir les actions de recherche GALG, GPLAT et Généralisation du Réseau) et la généralisation contextuelle centrée sur la généralisation de données urbaines provenant de la BD TOPO, ainsi que sur la généralisation des données orographiques. Que ce soit pour l'urbain ou le relief, une généralisation locale ne peut donner satisfaction. Il est alors indispensable de qualifier l'espace géographique, afin de prendre des décisions de généralisation appropriées. Les recherches en généralisation contextuelle ont donné lieu au développement du système expert orienté-objet *Strategie*, dont nous présenterons ci-dessous quelques résultats.

Objectif

L'objectif est de cette action de recherche est de trouver les méthodes d'analyse spatiale ainsi que des algorithmes basés sur ces analyses afin de généraliser correctement l'information géographique.

Résultats

La généralisation de données urbaines sur Strategie

Le principe de la généralisation contextuelle automatisée repose avant tout sur une identification et une représentation explicite de l'information géographique afin que l'ordinateur puisse lui-même faire le choix des méthodes adaptées à l'espace géographique qu'il doit généraliser. Dans une base de données, l'information stockée est extrêmement sommaire, puisque très peu de relations et de connaissances sont représentés. Or, lorsqu'un cartographe généralise des données, il identifie d'une part, des phénomènes géographiques (des quartiers, des réseaux), il détecte leurs caractéristiques (les formes, les répartitions spatiales), et la part de l'information qu'il juge soit conflictuelle soit superflue.

Nos efforts en généralisation contextuelle ont donc porté sur l'identification, la représentation et la caractérisation de phénomènes géographiques, de relations et de conflits nécessitant une généralisation. Nous avons, de plus, développé un ensemble de méthodes basées sur ces descriptions permettant de généraliser l'information tout en préservant les caractéristiques importantes.

Au niveau informatique, l'orienté-objet nous permet une représentation souple et évolutive d'un certain nombre d'informations. Le système expert nous permet d'établir des raisonnements, modifiables dynamiquement en fonction de l'évolution des données et d'optimiser les choix de candidats répondant au mieux à des critères définis. De plus, la modélisation s'oriente vers un mécanisme à base d'hypothèses, d'évaluations et de validations pour permettre d'une part, de réduire les espaces de solutions possibles, d'autre part, de contrôler dynamiquement les solutions proposées.

Thèse de Jean-François Hangouët : Généralisation contextuelle. Approche et méthodes en bord de ville

Ce travail est basé sur l'analyse spatiale de relations pouvant exister entre le bâti et le routier (orientation, proximité, desserte). La méthode d'analyse repose sur la création de structures de Voronoï permettant de mesurer l'espace géographique localement (calcul de densités locales ou une évaluation de la gravité des conflits de proximité). Ces analyses sont ultérieurement utilisées pour réaliser des regroupements géographiques de bâtiments qui permettent une élimination contextuelle des bâtiments.

Thèse de Nicolas Regnaud : Généralisation du bâti : modélisation sous forme de graphes pour guider la représentation du bâti à différentes échelles

Ce travail est basé sur l'identification et la caractérisation de groupe de bâtiments afin de permettre l'élimination des bâtiments les moins caractéristiques. La méthode d'analyse repose sur la construction d'arbres sans cycle à partir de relations de proximité entre bâtiments.

Chaque groupe est ensuite caractérisé sur des critères de taille, de forme et d'orientation des bâtiments. Une analyse des similitudes et des exceptions du groupe permet d'identifier les bâtiments candidats à l'élimination. De par la structure utilisée, cette méthode est surtout adaptée aux répartitions linéaires. La thèse de Nicolas Regnaud sera soutenue en avril 1998.

Thèse de Anne Ruas : Stratégies de généralisation urbaines à base de contraintes

Les contraintes sont des objets qui possèdent des méthodes permettant de les caractériser et de les évaluer (évaluation de la gravité des violations de contraintes). Lorsqu'un phénomène géographique doit être généralisé, il crée automatiquement des objets contraintes relatifs à sa nature. Les contraintes, après évaluation, proposent au phénomène une liste pondérée des meilleures méthodes permettant de les résoudre. Le phénomène choisit la meilleure contrainte à résoudre et déclenche un opérateur de généralisation (élimination contextuelle d'objets, déplacement, agrégation, élimination locale de bâtiments). Après chaque généralisation, les contraintes sont à nouveau évaluées afin de contrôler l'évolution de l'information. Ce mécanisme de contrôle permet de savoir si l'hypothèse de généralisation était bonne ou si une autre méthode doit être choisie. Il permet de plus de proposer l'opération suivante à réaliser en cas de création de conflits locaux.

Parallèlement à ce travail basé sur les stratégies, des algorithmes de sélection du réseau de rues, de déplacement et d'élimination de bâtiments (sur des structures en grille) ont été développés. La qualification des contraintes repose sur des analyses statistiques de triangulations locales de Delaunay.

La généralisation de l'orographie

Après la thèse de Pascale Monier sur la caractérisation du terrain en vue de sa généralisation soutenue en juillet 1997, un stage a été réalisé au laboratoire COGIT par Fabrice Mauger afin de hiérarchiser les réseaux de talwegs sur des critères variés. Ce travail de hiérarchisation est nécessaire à la réalisation de généralisation locales des structures morphologiques. Une thèse sur la généralisation de l'orographie basée sur les travaux sus-nommés devrait démarrer en septembre 1998.

Publications

[HANGOUËT, DJADRI 97] J-F. Hangouët & R. Djadri : *Voronoi Diagrams on Line Segments : Measurements for contextual Generalization Purposes*, COSIT'97, Laurel Highlands, Pennsylvanie (USA), 15-18 octobre 1997, in proceedings pp. 207-222), laboratoire COGIT, IGN-SR 970039/S-COM, octobre 1997.

[MAUGER 97] F. Mauger : *Hiérarchisation d'un réseau de talwegs en vue de sa généralisation*, stage DESS AIST Université de Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 970032/S-STA, octobre 1997.

[REGNAUD 97] N. Regnaud : *Structuration du bâti pour la généralisation*, ACI'97 Stockholm (S), vol. 3, p 1395-1401, laboratoire COGIT, IGN-SR 970045/S-COM, 1997.

[RUAS, MACKANESS 97] A. Ruas & W.A. Mackaness : *Strategies for urban map generalisation*, ACI'97 Stockholm, (S), vol. 3, p 1387-1394, laboratoire COGIT, IGN-SR 970014/S-COM, 1997.

Claude Boucher (responsable du thème géodésie)

C.4.1 Positionnement DORIS

Pascal Willis

Contexte

Le système DORIS est un système d'orbitographie développé par le CNES pour des missions satellitaires d'orbite basse (par exemple, les missions d'océanographie spatiale comme TOPEX/POSEIDON ou la future mission JASON-1). L'IGN participe à ce projet du CNES en assurant l'installation et la maintenance du réseau de poursuite au sol (SIMB).

De plus, l'IGN conduit des recherches depuis 1991 sur l'utilisation de ce système français de géodésie spatiale pour des applications géodésiques ou géophysiques de haute précision dans le cadre du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS). Enfin, depuis 1994, l'IGN assure la coordination internationale du système DORIS (coordinateur : P. Willis) pour le Service International de la Rotation Terrestre (IERS).

Objectifs

Les objectifs de recherche à l'IGN pour le système DORIS sont multiples :

- améliorer la modélisation et le traitement des mesures DORIS (développement logiciel, études, simulations),
- utiliser ces outils logiciels pour obtenir des résultats scientifiques directement exploitables pour le Service International de la Rotation Terrestre (coordonnées géodésiques précises et vitesses des stations du réseau permanent de poursuite des satellites DORIS, détermination précise des paramètres de la rotation terrestre,...)
- utiliser le système DORIS pour déterminer la position précise de nouvelles stations géodésiques stationnées au cours de campagnes d'observation spécifiques pour lesquelles l'IGN a un intérêt particulier (colocation des instruments de géodésie spatiale dans le monde, rattachement géodésique des marégraphes dans un système mondial de référence.

Nouveaux développements logiciels

En 1997, plusieurs études ont pu être menées à terme grâce en particulier à deux stagiaires du DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie :

- O. Dorie (ingénieur IGN) : solutions géodésiques mensuelles DORIS (déterminations mensuelles des coordonnées géodésiques des stations du réseau de poursuite DORIS),
- R. Garmier : modélisation du frottement atmosphérique pour les satellites SPOT-2 et SPOT-3.

Le premier stage a permis, d'affiner la stratégie de calcul des solutions mensuelles et surtout de calculer les coordonnées de toutes les stations de poursuite dans un système de référence stable dans le temps. En particulier, une automatisation de la procédure a pu être faite afin de mettre à disposition tous les résultats sur le Web pour d'autres types d'étude (eg. géophysique). De plus, des études scientifiques plus exhaustives ont pu être menées sur la stabilité des résultats DORIS en terme de facteur d'échelle (lié directement à la réalisation de l'unité de longueur) et de l'origine du repère (liée aux variations temporelles du géocentre).

Le deuxième stage a permis de conforter les stratégies développées dans le passé pour la prise en compte du frottement atmosphérique sans toutefois permettre d'espérer gagner en précision des résultats. Il semble qu'actuellement les effets systématiques dus aux erreurs de modélisation du frottement atmosphérique restent encore faibles par rapport à d'autres erreurs (champ de gravitation).

Ce point devra être reconsidéré vers 1999 après l'utilisation de nouveaux modèles de champ issus de la mission franco-allemande CHAMP. De plus, les études menées depuis plusieurs années sur les stratégies d'estimation de la correction troposphérique (partie basse de l'atmosphère) ont fait l'objet d'une présentation au congrès IAPSO/IAMAS de Melbourne.

Enfin, certains effets non encore pris en compte dans les calculs comme les surcharges océaniques (déformation locale de la croûte terrestre à proximité des côtes liées aux variations de masses dû au phénomène des marées océaniques), ont commencé à être pris en compte grâce à une collaboration avec de H.-G. Scherneck (Onsala Space Observatory, Suède). Ces développements récents n'ont pas encore pu être testés entièrement et ne sont donc pas pris en compte dans les résultats présentés dans ce compte rendu.

Résultats scientifiques pour l'IERS

Comme chaque année, une nouvelle solution globale de toutes les mesures DORIS disponibles (de janvier 1990 à juin 1997) a été entièrement recalculée en tenant compte des développements logiciels récents. Cette solution (positions et vitesses de toutes les stations DORIS du réseau permanent) a été soumise à l'IERS. C'est l'une des trois solutions DORIS utilisées pour l'ITRF96.

Les calculs mensuels individuels ont été de plus soumis à l'IERS, dans le format d'échange SINEX (à titre expérimental) afin de déterminer d'éventuels mouvements du géocentre dûs aux déplacements saisonniers de masses (atmosphère, océans).

Cette campagne pilote en conjonction avec d'autres techniques (GPS, SLR) a permis de mettre en évidence un effet annuel qui devra être pris en compte à l'avenir dans les modélisations futures. D'autres effets, à plus court terme, restent encore controversés.

Ces recherches ont fait l'objet d'une présentation à l'AGU en décembre 1997 et feront l'objet d'une publication scientifique en 1998. Ces solutions sont disponibles sur le site DORIS internet de l'IGN (variations du géocentre, position mensuelle des stations de poursuite DORIS).

A titre expérimental, des solutions hebdomadaires, calquées sur les calculs GPS réalisés dans le cadre de l'International GPS Service (IGS), ont été calculées par l'IGN et largement diffusées à l'extérieur fin 1997, pour toute une série de recherches scientifiques en aval : détermination d'éventuelles variations du géocentre, solutions combinées GPS DORIS. Ces solutions ont été calculées pour toutes les semaines 739 (mars 1994) à 872 (septembre 1996), qui est la période durant laquelle trois satellites DORIS étaient opérationnels.

Les figures C.4.1.1 à C.4.1.3 montrent un exemple des résultats obtenus à partir des mesures DORIS de la station Ile de Pâques (EASA), traitées semaine après semaine de mars 1994 à septembre 1996. On voit qu'il est facile de détecter le mouvement horizontal dû à la dérive des plaques tectoniques (qui pour cette station particulière n'est pratiquement sensible qu'en longitude).

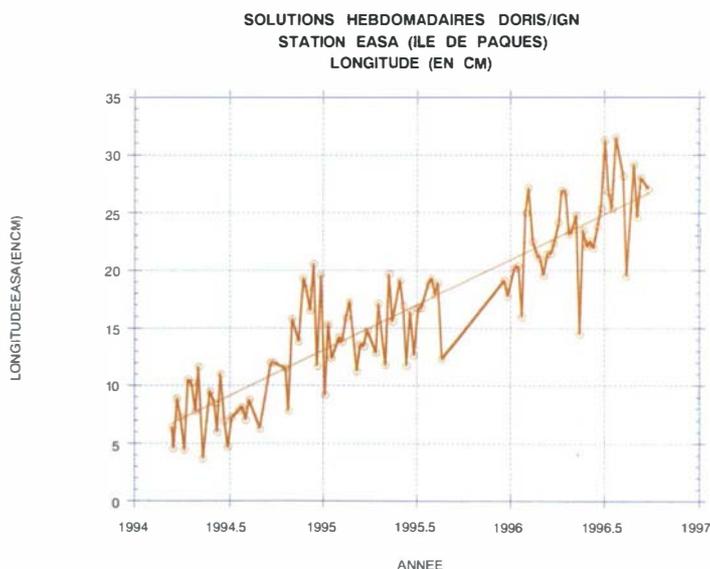


figure C.4.1.1

SOLUTIONS HEBDOMADAIRES DORIS/IGN
STATION EASA (ILE DE PAQUES)
LATITUDE (EN CM)

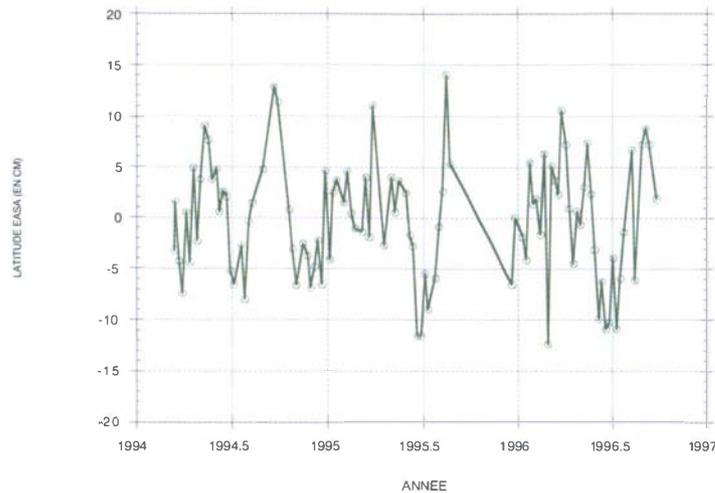


figure C.4.1.2

La figure C.4.1.3 montre que les résultats obtenus pour la composante verticale sont aussi d'excellente qualité (quelques centimètres pour une durée d'observations relativement réduite).

SOLUTIONS HEBDOMADAIRES DORIS/IGN
STATION EASA (ILE DE PAQUES)
ALTITUDE (EN CM)

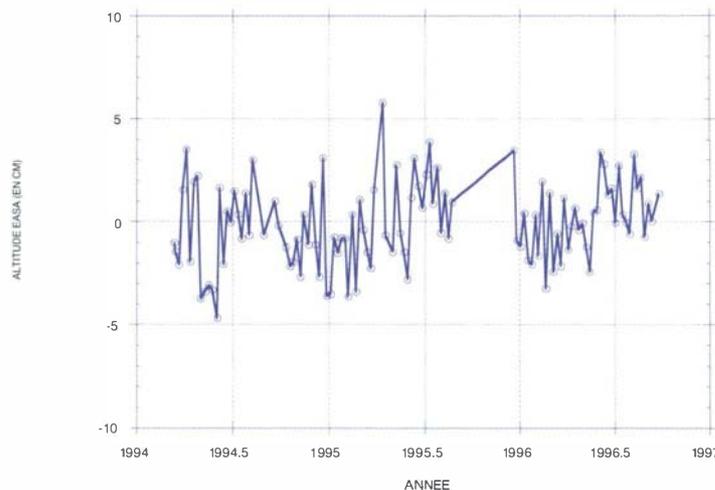


figure C.4.1.3

Coordination internationale DORIS pour l'IERS

Actuellement quatre groupes participent aux activités DORIS pour l'IERS : le GRGS/CNES, le CNES/SOD, l'Université du Texas et l'IGN. Un site Web a été créé afin de permettre une meilleure diffusion des informations et résultats DORIS (<http://lareg.ensg.ign.fr/DORIS>). De plus, une messagerie électronique a été créée par abonnement (soixante-seize abonnés dans le monde en février 1998).

L'IGN est un des deux centres mondiaux de données DORIS/IERS avec celui de la NASA américaine au CDDIS. Toutes les mesures DORIS y sont archivées depuis mars 1994. En ne comptant que les accès extérieurs à l'IGN, pour 1997, le centre IGN a été consulté 7116 fois sur le serveur Web (consultation) et 547 fois sur le serveur ftp (récupération de fichiers-données DORIS). Pour le serveur Web, il y a eu 348 utilisateurs extérieurs (de trente-sept nationalités) et quarante-neuf utilisateurs extérieurs pour le serveur ftp (de dix nationalités).

Campagnes de localisation DORIS

Il existe d'autres données DORIS en dehors de celles déjà évoquées ici pour le réseau permanent d'orbitographie. Certains points géodésiques ont été observés pour le SHOM, l'ORSTOM et l'IGN. Il serait intéressant de pouvoir traiter ces mesures. Des contacts ont été pris en 1997 pour pouvoir récupérer à l'IGN tout ou partie de ces

données. En attendant ces données, les logiciels ont été améliorés pour pouvoir traiter simultanément les mesures du réseau de poursuite et d'autres mesures complémentaires DORIS.

Publications

[DORIE 97] O. Dorie : *Recherche d'une procédure optimale pour transformer les coordonnées mensuelles DORIS dans un système de référence mondial maintenu de manière fiable dans le temps*, rapport de stage de DEA, Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS 6, juin 1997.

[GARMIER 97] R. Garmier : *Modélisation et estimation du frottement atmosphérique sur les satellites SPOT-2 et SPOT-3 dans le cadre du système DORIS*, rapport de stage de DEA, Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS7, juin 1997.

[SILLARD et al 97] P. Sillard, P. Willis & C. Boucher : *GPS and DORIS Combined Geocenter Motion from Reference Frame Time Serie Analysis*, American Geophysical Union, San Francisco (USA), IGN/LARE CM051, décembre 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Applications scientifiques du système DORIS*, présentation au séminaire du Bureau des Longitudes, Paris (F), IGN/LAREG CM043, avril 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Applications scientifiques du système DORIS*, in Revue XYZ, 73, 4, pp. 67-74, décembre 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Localisation DORIS à l'IGN*, Groupe de Revue d'exploitation des missions DORIS/SPOT et TOPEX/POSEIDON, Toulouse (F), IGN/LAREG CM037, 29 janvier 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Notice utilisateur du logiciel GIPSY/OASIS pour les calculs DORIS à l'IGN, version 1*, IGN/LAREG SP7, février 1997.

[WILLIS et al 97] P. Willis, P. Sillard & C. Boucher : *Processing DORIS/IERS Data in a Free-Network Approach for Geocenter Variations Monitoring*, American Geophysical Union, San Francisco (USA), IGN/LAREG CM051, décembre 1997.

[WILLIS, ZUMBERGE 97] P. Willis & J. Zumberge : *Estimation of the tropospheric delay using the DORIS system in a multi-satellite mode*, IAPSO/IAMAS Conference, Melbourne, Australie, Juillet 1997, IGN/LAREG CM 044.

C.4.2 Détermination du géoïde

Pascal Willis

Contexte

Deux éléments ont rendu cette action de recherche nécessaire :

- la mise en service du Réseau Géodésique Français (RGF) qui permet à l'utilisateur GPS d'obtenir une hauteur ellipsoïdale dans le système de référence RGF93,
- plusieurs travaux de recherche récents (IGN, ESGT, Université de Hanovre, NASA) ont abouti à la réalisation de modèle de géoïdes et surfaces dérivées susceptibles d'être utilisés pour transformer la hauteur ellipsoïdale obtenue par GPS en altitude de type nivellement.

Un utilisateur GPS n'a accès qu'à une altitude ellipsoïdale (non liée à la pesanteur) et il est utile de lui fournir un algorithme de correction pour obtenir une altitude dans le système légal IGN69. Le but de cette étude est d'évaluer les différents modèles d'un point de vue utilisateur. Elle se place dans le cadre d'un sous-groupe de travail de dix-sept personnes du CNIG appelé "Conversion altimétrique RGF93-IGN69", regroupant les producteurs de modèles, des utilisateurs et des constructeurs de matériel GPS. Cette étude doit aboutir courant 1998 sur une recommandation du CNIG.

Jean-Mathieu Nocquet a été mis à disposition du laboratoire LAREG par le Service de Géodésie et du Nivellement (SGN) pour la durée de cette étude.

Travaux réalisés en 1997

Un appel à participation a été rédigé avec pour objectif de recenser les modèles et obtenir des données indépendantes des modèles permettant leur évaluation. Cette démarche a été un succès, environ vingt-cinq personnes et organismes ont répondu. Une première réunion du sous-groupe a eu lieu en décembre où se sont exprimés utilisateurs, constructeurs et techniciens.

A la demande des utilisateurs, un serveur web a été mis en place (<http://lareg.ensg.ign.fr/gtp.psd/alti.html>). Il présente l'avancement des travaux du sous-groupe, une représentation des modèles, et les données mis à disposition de l'évaluation par les membres du sous-groupe.

Deux nouveaux modèles de conversion altimétrique RGF93-IGN69, ont été réalisés :

- GGF97 : obtenu en utilisant uniquement des informations de points GPS nivelés (hors mesures gravimétriques),
- EGG97-1D : modèle développé à partir du modèle européen EGG97, développé par l'Université de Hanovre (W. Torge, H. Denker) et de mesures françaises de points GPS nivelés.

EGG97-1D

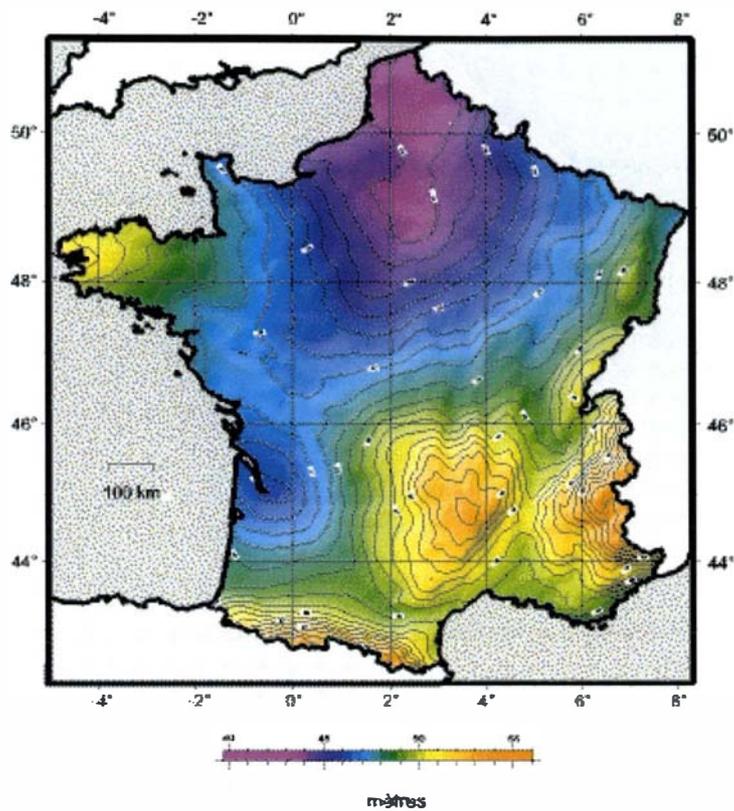


figure C.4.2.1

GGF97

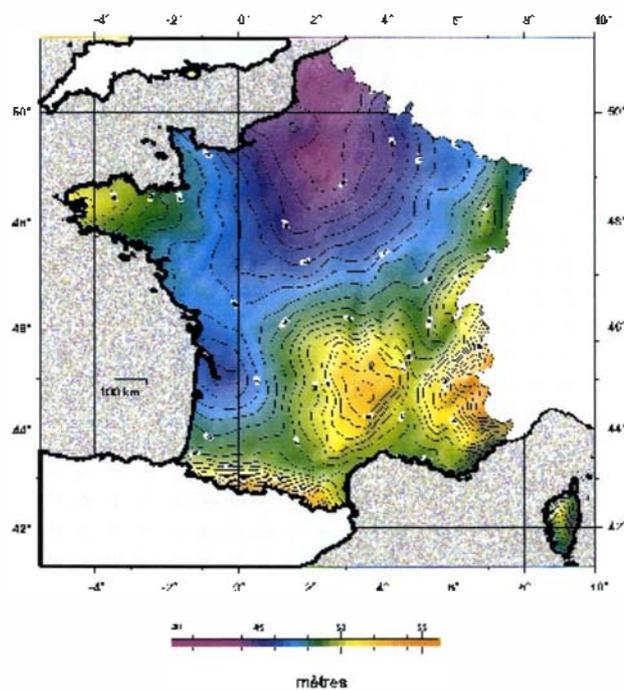


figure C.4.2.2

Les premières intercomparaisons des modèles ont montré que trois modèles étaient plus intéressants que d'autres : GGF97 surface interpolée des données du RGF, RAF96 réalisé par H. Duquenne (ESGT/IGN) et EGG97.1D. Les résultats des comparaisons et tests montrent un bon accord des modèles en plaine (quelques centimètres), des problèmes sur les reliefs et une zone particulièrement mauvaise où les écarts sont de plusieurs dizaines de centimètres.

Afin de pouvoir mieux évaluer ces différents modèles de correction, des campagnes de mesures GPS de contrôle ont été spécifiées et seront réalisées au printemps 1998 par le SGN et d'autres partenaires. Les résultats obtenus doivent être présentés au CNIG (Conseil National de l'Information Géographique) vers la mi-1998.

Publications

[NOCQUET 97] J-M. Nocquet : *Liste d'outils en vue de l'étude d'évaluation des modèles de conversion entre les systèmes RGF93 et IGN69*, IGN/LAREG CR 17.

[NOCQUET 97] J-M. Nocquet : *Conversion RGF93-IGN69, premières comparaisons et résultats préliminaires*, compte rendu de la présentation faite au Groupe de Travail Permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique" du 5 juin 1997.

[NOCQUET 97] J-M. Nocquet : *Compte rendu de la réunion du sous-groupe de travail du CNIG "Conversion Altimétrique RGF93-IGN69"*, IGN/LAREG CR 22, 1er décembre 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Lettre de mission de M. Nocquet*, réf LAREG 97-274, 23 mai 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Compte rendu du Groupe de Travail Permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique" du 7 mars 1997*, IGN/LAREG CR 16, 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Compte rendu du Groupe de Travail Permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique" du 5 juin 1997*, IGN/LAREG CR 18, 1997.

C.4.3 Étude du mouvement tectonique par méthodes géodésiques

par Thierry Duquesnoy

Contexte

La mesure directe des mouvements des plaques lithosphériques est un des thèmes de recherche en plein développement depuis l'apparition des techniques spatiales. En effet celles ci donnent la possibilité de travailler avec une grande précision à des échelles différentes. En particulier, la possibilité de mesurer des réseaux à grandes échelles (plusieurs centaines de kilomètres) permet de contraindre les modèles de tectonique globale.

Objectifs

- Détermination des mouvements instantanés (à l'échelle des temps géologiques) et absolus des plaques lithosphériques par l'utilisation des méthodes de géodésie spatiale,
- Comparaison de ces mouvements avec les mouvements relatifs à long terme des modèles de tectonique globale issues des mesures sur les failles transformantes, les mécanismes au foyer et les anomalies magnétiques,
- Détermination de la réponse lithosphérique à la dynamique terrestre,
- Détermination des vitesses de déformation à l'échelle régionale aux frontières de plaques et dans les zones intraplaques,
- Surveillance et dynamique des volcans.

Activités - résultats

Le premier semestre 1997 s'est conclu par la soutenance de thèse intitulée : Contribution de la géodésie à l'étude de grands décrochements actifs à l'arrière de zones de subduction à convergence oblique. Exemple de la faille Philippine et de la Grande Faille de Sumatra.

Après une brève présentation des techniques géodésiques disponibles, une présentation cinématique du Sud-Est Asiatique est faite. Les résultats des deux réseaux géodésiques implantés au sud et au centre de Sumatra sont exposés. Les résultats concernant les trois réseaux géodésiques installés dans la partie centrale de la faille philippine sont ensuite présentés.

Nous cherchions à connaître l'apport de la géodésie dans l'étude de grands décrochements actifs à l'arrière des zones de subduction. Ce travail a fait l'objet de plusieurs collaborations dans le cadre de projets pluridisciplinaires englobant au moins une étude géodésique et une étude tectonique. Dans les cas des réseaux le long de la faille Philippine, nous disposons aussi d'une étude sismologique. Pour mener nos études nous avons implanté quatre réseaux géodésiques sur deux zones géographiques, Ranau-Liwa et Padang-Singkarak le long de la Grande Faille de Sumatra et trois réseaux le long de la Faille Philippine à Leyte, Tongonan et Masbate. Lors de l'installation de ces

réseaux en 1991, nous avons installé quatre réseaux qui devaient être mesurés par GPS et trois réseaux de trilatération. Dès la deuxième itération, le réseau de trilatération installé aux Philippines a aussi été mesuré à l'aide de récepteurs GPS.

La répétition des mesures sur les réseaux le long de la Grande Faille de Sumatra s'est déroulée à la suite du séisme de Liwa de février 1994. Au niveau des réseaux de Liwa, les mesures géodésiques ont permis de mesurer les déplacements cosmiques et ainsi de contraindre un modèle simple de rupture [Duquesnoy et al., 1996]. En utilisant en plus des données de sismicité, nous avons pu établir une vitesse de déplacement le long de la faille compatible avec les données tectoniques. Les résultats obtenus sur le réseau de trilatération autour du lac de Singkarak nous ont permis de montrer que la Grande Faille de Sumatra était bloquée dans cette région. Le réseau GPS à mailles plus larges nous a permis de quantifier une vitesse minimale le long de la Faille de Sumatra dans cette région. Ces deux résultats sont importants dans l'évaluation du risque sismique. En revanche, il ne nous a pas été possible avec nos réseaux de mettre en évidence une éventuelle extension dans la lanière située entre les failles de Mentawai et de Sumatra. En effet si cette extension existe, son taux est trop faible pour être détectable aussi rapidement. Une itération régulière du réseau permettra d'augmenter la précision des vitesses calculées. En revanche un raccourcissement dans une direction quasi perpendiculaire à la direction de la faille de Sumatra est très visible entre les côtes Est et Ouest de l'île avec le réseau GEODYSSSEA.

Les réseaux le long de la faille des Philippines ont en général été mesurés plus de deux fois. Seul le réseau de Masbate n'a que deux séries de mesures. Le réseau de Leyte a trois séries de mesures et le réseau de Tongonan quatre. La répétition du réseau de Masbate a permis de montrer que la région étudiée se situait au niveau de la transition entre une région où la faille est bloquée (au sud du réseau) et une région où la faille flue. La vitesse parallèle à la faille Philippine la plus élevée que nous calculons est de 30 mm/an, ce qui est inférieur à la vitesse le long de la Faille Philippine déduite des autres réseaux (35 mm/an). Cela signifie que nous n'avons pas absorbé l'ensemble du mouvement le long de la faille pendant l'intervalle de mesures. Il sera donc intéressant de mesurer de nouveau ce réseau afin de connaître l'évolution de cet écart et de savoir comment il est absorbé.

La Faille Philippine n'est pas bloquée et flue au niveau de Leyte. Ce résultat, s'il était supposé par l'absence de sismicité historique dans la région et la présence d'un champ géothermique ce qui suppose un gradient thermique élevé, a été confirmé par notre réseau géodésique. Les données sur ce réseau ont permis de quantifier la vitesse de déplacement le long de la faille. La valeur trouvée est plus élevée que celle estimée par les données tectoniques et cinématiques. Les données tectoniques sont fortement dépendantes des datations qui sont imprécises.

En revanche, l'écart entre la vitesse déduite des données cinématiques (25 à 30 mm/an) et la vitesse déduite des données géodésiques (35 mm/an) ne s'explique que par une erreur sur la valeur du taux de convergence entre la plaque de la mer des Philippines et la plaque Eurasiatique utilisée dans le calcul cinématique. Cette valeur, issue des modèles globaux de géodynamique, est peu contrainte par les données. En effet, la plaque de la mer des Philippines n'est bordée que de subductions. Dans le calcul cinématique, on obtient la valeur de la vitesse le long de la faille Philippine en partant de la valeur du taux de convergence entre les deux plaques. Par conséquent, en suivant le chemin inverse, on peut obtenir le taux de convergence en connaissant la vitesse le long de la faille Philippine. Le réseau géodésique de Leyte permet donc de calculer une valeur du taux de convergence. L'ensemble des réseaux de Leyte et de Tongonan nous a permis de faire l'hypothèse de l'existence d'une branche supplémentaire de la faille dans la zone de relais étudiée. Cette hypothèse, quoique fort probable, reste à vérifier sur le terrain. L'étude du réseau de Tongonan nous permet de mieux comprendre le fonctionnement d'un relais de la faille Philippine. Cependant, il semble nécessaire de continuer l'étude en augmentant la fréquence des mesures.

Publications

[DIAMENT et al 95] M. Diament, Ph. Jousset, F. Beauducel, S. Dwipa & T. Duquesnoy : *Microgravity and elevation variations monitoring on Merapi Volcano (Indonesia)*, *International Union of Geodesy and Geophysics*, XXI General Assembly, Boulder (USA), IGN-SR 95010/L-COM, 1995.

[JOUSSET et al 97] Ph. Jousset, S. Dwipa, F. Beauducel, T. Duquesnoy & M. Diament : *Temporal gravity at Merapi during the 1993-1995 crisis : an insight into the dynamical behavior of volcanoes*, in J. of Volc. and Geoth. Res., sous presse, IGN-SR 97013/L-ART, 1997.

[RUEGG et al 96] JC. Ruegg, J. Campos, R. Armijo, S. Barrientos, P. Briole, R. Thiele, M. Arancibia, J. Canuta, T. Duquesnoy, M. Chang, D. Lazo, H. Lyon-Caen, L. Ortlieb, JC. Rossignol & L. Serrurie : *The Mw = 8.1, Antofagasta (North Chile) earthquake of July 30, 1996 : first results from teleseismic and geodetic data*, in *Geophys. Res. Lett.*, 23, 9, 917-920, IGN-SR 96012/L-ART, 1996.

[SÉBRIER et al 93] M. Sébrier, O. Bellier, J. Deverchère, M. Kasser, R. Louat & T. Duquesnoy : *Aléa sismique et paramètres de la déformation active associés à la Grande Faille de Sumatra (Indonésie)*, rapport final, Publication Laboratoire de Géophysique et Géodynamique Interne, Université Paris-Sud, IGN-SR 93006/L-ART, Orsay, 1993.

[BARRIER, DUQUESNOY 91] E. Barrier & T. Duquesnoy : *Etude sismotectonique de la partie centrale de la faille Philippine*, IGN-SR 910188/Z-RAP, 1991.

[DUQUESNOY 92] T. Duquesnoy : *Le cycle sismique de subduction : l'exemple du Nord-Chili*, rapport de stage de DEA, Publication Institut de Physique du Globe de Paris, IGN-SR 920003/Z-STA, 1992.

[DUQUESNOY 97] T. Duquesnoy : *Contribution de la Géodésie à l'étude des grands décrochements actifs associés à des zones de subduction à convergence oblique. Exemples de la Grande faille de Sumatra et de la faille Philippine*, thèse de l'Université Paris Sud-Orsay, IGN-SR 97013/L-THE, 1997.

[DUQUESNOY et al 91] T. Duquesnoy, O. Bellier, O. Sébrier, M. Kasser : *Geodetic survey of the central and southernmost segments of the Great Sumatran Fault (Indonesia)*, preliminary report, IGN-SR 910189/Z-RAP, 1991.

[DUQUESNOY et al 92] T. Duquesnoy, JC. Ruegg & A. Hernandez : *Implantation géodésique autour du point triple de Jalisco*, rapport, IGN-SR 920004/Z-RAP, 1992.

[DUQUESNOY et al 92] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Kasser & M. Sébrier : *Etude géodésique de la partie centrale et méridionale de Sumatra (Indonésie) : contribution à l'étude sismotectonique de la faille de Semangka, rapport de mission*, IGN-SR 920006/L-CRD, 1992.

[DUQUESNOY et al 94] T. Duquesnoy, E. Barrier, M. Kasser, M. Aurelio, R. Gaulon, RS. Punongbayan, C. Rangin & l'équipe de coopération franco-philippine : *Detection of creep along the Philippine Fault : first result of geodetic measurements on Leyte island, central Philippine*, in Geophys. Res. Lett., 21, 11 p. 975-978, IGN-SR 94005/L-ART, 1994.

[DUQUESNOY et al 94] T. Duquesnoy, E. Barrier, M. Kasser, M. Aurelio, R. Gaulon, RS. Punongbayan & C. Rangin : *Detection of creep along the Philippine Fault by geodetic measurements*, in Annales Geophysica., IGN-SR 94018/L-ART, 1994.

[DUQUESNOY et al 94] T. Duquesnoy, O. Bellier, Ch. Vigny, M. Kasser & M. Sébrier : *D₁ formation cosismique du séisme de Liwa du 15 février 1994 et évaluation du risque sismique au sud de Sumatra (Indonésie) : apport des mesures géodésiques*, rapport DRM, IGN-SR 94019/L-RAP, 1995.

[DUQUESNOY et al 95] T. Duquesnoy, E. Barrier & M. Kasser : *Geodetic Survey of the Philippine Fault*, in Terra abstracts 7, EUG Strasbourg (F), IGN-SR 950003/L-COM, 1995.

[DUQUESNOY et al 97] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Kasser, M. Sébrier, Ch. Vigny & I. Bahar : *Deformation related to the 1994 Liwa earthquake derived from Geodetic Measurements*, in Geophys. Res. Lett., 23, 21, 3055-3058, IGN-SR 960002/L-ART, 1996.

[DUQUESNOY et al 97] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Kasser, M. Sébrier, Ch. Vigny, I. Bahar, E. Putranto, F. Ego & I. Effendi : *Geodetic evidence for the seismic behaviour of the Great Sumatran Fault (Indonesia)*, in Terra Nova 9, EUG Stasbourg, IGN-SR 97014/L-COM, 1997.

[DUQUESNOY et al 97] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Sébrier, M. Kasser, Ch. Vigny, I. Bahar, E. Putranto & I. Effendi : *Etude géodésique d'un segment sismique de la Grande Faille de Sumatra (Indonésie)*, soumis à Soc. Géol. de France, IGN-SR 970015/L-ART, 1997.

[KASSER et al 94] M. Kasser, O. Bellier, T. Duquesnoy & M. Sébrier : *Geodetic Survey of the Great Sumatran Fault*, in Annales Geophysica., IGN-SR 94020/L-ART, 1994.

[SÉBRIER et al 93] M. Sébrier, O. Bellier, J. Deverchère, M. Kasser, R. Louat & T. Duquesnoy : *Aléa sismique et paramètres de la déformation active associés à la Grande Faille de Sumatra (Indonésie)*, rapport final, Publication Laboratoire de Géophysique et Géodynamique Interne, Université Paris-Sud, Orsay, IGN-SR 93006/L-RAP, 1993.

C.4.4 JASON

Pascal Willis

Contexte

JASON est un projet franco-américain d'altimétrie spatiale qui prolongera la mission actuelle TOPEX/POSEIDON (lancement prévu en mai 2000). Une des difficultés scientifiques de ce projet est d'être capable à cette date d'obtenir une orbite opérationnelle du satellite pour les applications océanographiques à une précision de l'ordre du centimètre pour la composante radiale (soit une amélioration d'un facteur 2 à 3 par rapport aux résultats obtenus actuellement dans le cadre de la mission TOPEX/POSEIDON!).

La qualité de l'orbite est un facteur limitant pour toutes les applications océanographiques en aval (détermination du niveau moyen de la mer et surveillance à long terme de ses variations, marées océaniques, circulation océanique, etc.).

Objectif

Le but est d'essayer de déterminer toutes les erreurs provenant des références géodésiques qui pourraient affecter l'exactitude des résultats orbitographiques. Dans un deuxième temps, il est aussi indispensable de proposer des solutions opérationnelles qui pourraient être mises en place dès le lancement du prochain satellite JASON-1. Cette recherche est faite en étroite collaboration avec le groupe CNES/SOD qui sera le centre opérationnel de calculs orbitographiques pour la mission JASON-1.

Cette étude s'insère en particulier dans une démarche plus générale du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS) visant à améliorer à terme l'exactitude des calculs d'orbitographie (groupe DOP dirigé par R. Biancale du GRGS/CNES).

Résultats obtenus en 1997

Une première réflexion a permis de dégager les différents aspects où les références géodésiques interviennent dans le résultat orbitographique :

- réalisation du système de référence terrestre (géocentre, facteur d'échelle, orientation),
- qualité des coordonnées géodésiques des stations de poursuite (en particulier pour leur composante verticale).

En parallèle, des recherches sont envisagées :

- réalisation d'un nouveau système de référence géodésique incluant toutes les stations de poursuite pour l'océanographie spatiale (en particulier les stations PRARE qui ne sont pas actuellement dans les solutions opérationnelles du Service International de la Rotation Terrestre), ainsi que d'autres stations d'intérêt océanographique particulier (sites de calibration des altimètres, marégraphes),
- campagnes géodésiques de rattachement de marégraphes à un système mondial de référence géodésique.

Dans ce contexte, l'IGN a fait une proposition de recherche au CNES (investigateur principal : P. Willis) en collaboration avec le CNES/SOD suite à l'appel à proposition scientifique CNES/NASA pour JASON-1.

Une thèse a été financée par l'IGN sur ce sujet en 1997. Le candidat retenu (L. Morel) débutera son travail de thèse en début 1998.

Publications

[WILLIS et al 97] P. Willis, C. Boucher & P. Sillard : *Geodetic Reference Frames for Future Altimetric Missions*, JASON Science Working Team meeting, Baltimore (USA), IGN/LAREG CM044, mai 1997.

[WILLIS et al 97] P. Willis, C. Boucher, L. Morel, P. Sillard, G. Wöppelmann, J-P. Berthias, S. Houry & A. Piuze : *Geodetic References for Future Altimetric Missions*, Réponse à l'Appel à Participation NASA/CNES, Groupe de Travail Scientifique JASON-1, IGN/LAREG 97.647, décembre 1997.

C.4.5 Positionnement PRARE

Pascal Willis

Contexte

PRARE est un nouveau système d'orbitographie précise développé par le GeoForschungZentrum (GFZ) allemand. C'est un système plus complexe que le système DORIS car il permet d'effectuer simultanément des mesures de distances précises (quelques centimètres) et des mesures Doppler.

Un premier instrument PRARE fonctionne sur le satellite ERS-2. Bien que ce système soit donc très attrayant pour des applications classiques de géodésie spatiale (orbitographie précise, positionnement géodésique des balises au sol, détermination de la rotation terrestre), il ne faut pas cacher non plus que le réseau de poursuite est actuellement l'un des points faibles de ce système, à cause de sa faible couverture mondiale. C'est aussi un système plus complexe que le système français DORIS (concurrent direct pour l'orbitographie précise de satellites bas), puisque c'est un système aller-retour : le signal est envoyé par les balises au sol vers le satellite qui le renvoie ensuite à son tour vers les balises au sol. Le principe de la mesure consiste grossièrement à une mesure de distance aller-retour entre le satellite et la balise au sol.

Objectif

L'objectif de cette recherche est d'essayer d'utiliser au mieux pour les applications géodésiques les données de ce nouveau système allemand. Pour cela, des développements informatiques autour du logiciel américain GIPSY/OASIS du Jet Propulsion Laboratory sont indispensables.

L'objectif est ensuite de développer de nouvelles stratégies de calculs afin d'essayer d'améliorer les résultats géodésiques. En plus d'une meilleure connaissance sur ce système, ces recherches devraient permettre d'obtenir de nouvelles informations qui pourraient être réutilisées à terme pour le système français DORIS (par exemple, l'intérêt de pseudo-distances DORIS ou de mesures Doppler plus précises) ou pour le futur système européen GNSS (Global Navigation Satellite System) de radionavigation par satellites.

Recherches effectuées en 1997

Une première partie du travail en 1997 a été une prise de contact avec nos partenaires étrangers :

- Jet Propulsion Laboratory (USA) : pour s'assurer que les nouveaux développements prévus autour de leur logiciel présentaient aussi un intérêt de leur part,

- GeoForschungZentrum (Allemagne) : pour s'assurer de l'accès aux données PRARE/ERS2 pour des études scientifiques et pour récupérer toute la documentation nécessaire aux développements logiciels (format, spécification, modélisation de la mesure, résultats actuels).

Une mission courte au JPL a permis dans un premier temps de développer un lecteur des données PRARE pour les transformer en format GIPSY/OASIS. Les données n'ont pu être traitées en 1997, faute de temps. En particulier les modèles relatifs au satellite ERS-2 n'ont pas pu être développés. Cette recherche sera prolongée en 1998 par une proposition de stage de DEA.

Publication

[WILLIS 97] P. Willis : *Compte rendu de mission au Jet Propulsion Laboratory (JPL/USA)*, IGN/LAREG CR 14, janvier 1997.

C.4.6 GNSS et GLONASS

Pascal Willis

Contexte

GNSS (Global Navigation Satellite System) est le futur système de radionavigation européen par satellite. Dans une première étape, il doit utiliser une partie des systèmes GPS (américain) et GLONASS (russe) en les complétant avec un service d'information aux utilisateurs diffusé par un satellite géostationnaire (projet EGNOS). Dans un deuxième temps (vers 2010), il doit devenir totalement indépendant de ces systèmes déjà existant.

Objectif

L'objectif de cette recherche est d'acquérir une nouvelle compétence dans le positionnement GLONASS afin de pouvoir participer activement (d'une manière qui reste encore à définir) dans les futures évolutions européennes de systèmes de radionavigation par satellites.

Travaux effectués en 1997

Des contacts ont été pris avec le Jet Propulsion Laboratory pour voir dans quelle mesure le logiciel GIPSY/OASIS déjà utilisé pour le positionnement DORIS et GPS pourrait évoluer à terme.

Dans le cadre de l'Association Internationale de Géodésie, il a été décidé d'organiser pour 1998, une importante campagne d'observations géodésiques du système GLONASS (prévue du 20 septembre au 20 décembre 1998). P. Willis a été chargé cette campagne appelée IGEX-98 en tant que président de la sous-commission "Precise Satellite Microwave System" de la Commission VIII (CSTG) de l'AIG. Un groupe international d'organisation a été mis sur place pour établir rapidement un Appel International à Participation scientifique dont la première version a été préparée fin 1997.

Un site Web a été créé (<http://lareg.ensg.ign.fr/IGEX>) pour permettre de diffuser rapidement toutes les informations nécessaires à une préparation efficace de cette première campagne d'observation soutenue par l'IGS (International GPS Service), la Commission VIII de l'AIG (coordination des techniques spatiales), l'IERS (Service International de la Rotation Terrestre) et l'Institut Américain de Navigation (ION).

Il faut noter que cette campagne inclura aussi des observations de télémétrie laser (les satellites GLONASS sont équipés de rétroreflecteurs laser) et que l'équipe du GRGS/CERGA a d'ores et déjà prévu de soutenir cette initiative en 1998.

Par ailleurs, des informations techniques concernant les récepteurs GLONASS (ou mixte GPS/GLONASS) actuellement disponibles sur le marché ont été collectées afin de prévoir une acquisition de matériel en 1998 pour participer à la campagne IGEX-98.

Enfin, le laboratoire LAREG a hébergé un stagiaire de l'ENSG (G-H. Gurlinguer) qui a fait un stage de documentation générale sur le système GLONASS.

Publications

[GURLINGER 97] GH. Gurlinger : *Applications de GLONASS en Géodésie et Topographie*, mémoire de stage de l'ENSG, IGN/LAREG MS8, septembre 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *The International GLONASS Experiment (IGEX)*, ION Meeting, GPS97, IGN/LAREG CM 047, septembre 1997.

[WILLIS et al 97] P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R. Neilan & J. Slater : *The International GLONASS Experiment (IGEX-98)*, International Call For Participation, version 1 (préliminaire), décembre 1997

C.4.7 Système de référence terrestre

Claude Boucher, Zuheir Altamimi, Patrick Sillard

Études théoriques

Eléments méthodologiques

Dans la prolongation de ce qui a été fait en 1996, les recherches se sont surtout portées sur les aspects statistiques des réalisations de systèmes de référence : l'activité du laboratoire LAREG étant rythmée par les actions de services scientifiques pour le compte de l'IERS, l'amélioration de la compensation du repère international de référence terrestre (ITRF) est un des objectifs principaux de ces recherches.

Dans cette optique, l'un des problèmes principaux réside dans la compensation de populations statistiquement inhomogènes qu'il faut recalibrer de façon à disposer d'une compensation convenable. Cette année a été l'occasion de tester, sur un calcul "de routine" les méthodes qui ont été développées au cours de la thèse de P. Sillard [SILLARD 97a] : les résultats sont extrêmement encourageants puisque l'ITRF96 représente une avancée significative, aussi bien en terme de précision que probablement d'exactitude, par rapport à l'ITRF94. En effet, 50% des points de l'ITRF96 ont une précision de positionnement sub-centimétrique, et 30% des sites de l'ITRF96 bénéficient d'une précision en vitesses inférieure à 3 mm/an [SILLARD 97b].

Il est bien évident que ces avancées ne sont pas uniquement dûes aux améliorations méthodologiques : les données elles-mêmes se sont très certainement améliorées. Cependant, il est indéniable que le calcul est aujourd'hui plus satisfaisant qu'il n'était auparavant.

Etudes sur le champ de vitesse de l'ITRF96

Afin de mettre en valeur la qualité du champ de vitesse de l'ITRF96, des études ont été menées dans deux directions : d'une part, une analyse polaire du champ a été effectuée, d'autre part, une implémentation de la condition de non-rotation de l'ITRF96 a été proposée [SILLARD 98]. Dans le premier cas, les résultats ont été comparés aux modèles géophysiques de plaques tectoniques (NNR-NUVEL 1A) et les résultats sont très cohérents.

Dans le deuxième cas, les résultats sont très probants, et montrent que cette piste est à développer pour l'avenir, la phase ultime serait de pouvoir implémenter cette condition sans aucune hypothèse géophysique, par l'intermédiaire d'une discrétisation de la surface terrestre appuyée sur le réseau ITRF. L'étude menée en 1997 s'est appuyée, quant à elle, sur une partition de la surface à partir d'un graphe planaire du réseau ITRF et de son dual, le graphe de Voronoï, la surface de la Terre ayant été projetée, au préalable, à l'aide d'une projection équivalente. Les résultats numériques montrent que la condition de non-rotation est vérifiée à quelques millimètres près, ce qui est le niveau actuel de précision de l'ITRF96.

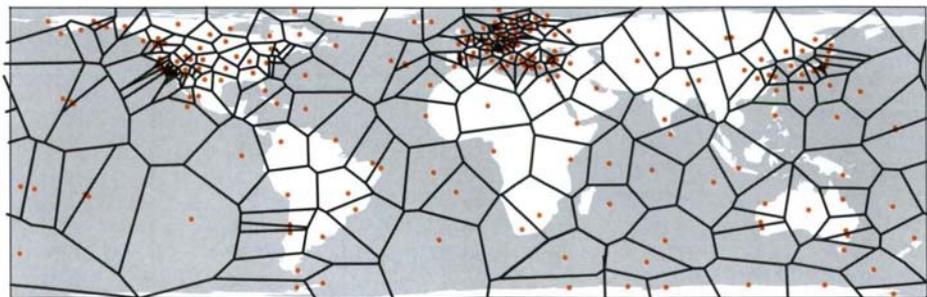


figure C.4.7.1 : graphe de Voronoï du réseau ITRF96

Réalisation de systèmes de référence terrestres

Réalisation et maintenance du système international de référence terrestre (ITRS)

Cette activité est essentiellement basée sur la réalisation de l'ITRS, appelée ITRF (IERS Terrestrial Reference Frame), la qualité et la maintenance de celui-ci. Rappelons que depuis 1988, l'ITRS est réalisé quasi annuellement, par combinaison de jeux de coordonnées et de vitesses de stations provenant des centres d'analyse VLBI, LLR, GPS (depuis 1991), SLR et DORIS (depuis 1994).

Ces réalisations, appelées ITRF_{aa}, sont : ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94 et ITRF96. Notons que l'ITRF_{aa} est réalisé l'année aa+1, utilisant les données des observations cumulées depuis les années 70 jusqu'à l'année aa.

Calcul et analyse de l'ITRF96

La stratégie adoptée actuellement dans l'analyse des combinaisons de repères de référence terrestre est double : combinaison simultanée de positions et vitesses de stations faisant intervenir les matrices de variances/covariances complètes, et un processus de pondération rigoureux, basé sur l'analyse et l'estimation des composantes de la variance en utilisant la méthode de Helmert.

Utilisant cette nouvelle stratégie, la solution ITRF96 représente une nouvelle génération de réalisation du Système International de Référence Terrestre. Cette réalisation a été obtenue en combinant des solutions de géodésie spatiale (VLBI, GPS, SLR et DORIS) reçues par le Bureau Central de l'IERS en 1995, 1996 et 1997.

Les solutions retenues pour le calcul de l'ITRF96 sont résumées dans le tableau C.4.7.2.

La combinaison globale de l'ITRF96 a été réalisée en incluant :

- les dix-sept solutions de géodésie spatiale fournies, en format SINEX, par les centres d'analyse IERS, voir le tableau C.4.7.2 ci-dessous,
- soixante-dix fichiers SINEX contenant les positions ainsi que des corrélations, construits à partir des rattachements locaux entre les stations en colocation.

L'ITRF96 a les propriétés suivantes :

- la définition de l'ITRF96 en termes de repère de référence terrestre est telle que l'origine, l'échelle, l'orientation et l'évolution temporelle sont les mêmes que pour l'ITRF94,
- les vitesses des stations appartenant à un même site ont été contraintes à être les mêmes,
- les facteurs de variance des matrices individuelles ont été estimés dans le processus de l'ajustement de cette combinaison qui a été réitérée,
- l'ITRF96 contient plus de cinq-cent points localisés dans 290 sites dont la répartition est illustrée par la figure C.4.7.3.
- il y a une nette amélioration de l'ITRF96 par rapport à l'ITRF94. La figure C.4.7.4 montre les erreurs formelles en positions des deux réalisations. Contrairement à l'ITRF94, l'ITRF96 possède plus de deux cents stations ayant une précision meilleure que le centimètre. De plus, la qualité de l'ITRF96 dépend de la qualité des solutions individuelles qui le composent. La qualité des solutions individuelles peut être reflétée par les RMS en positions et en vitesses donnés dans le tableau C.4.7.2 :

tableau C.4.7.2. les solutions retenues pour l'établissement de l'ITRF96

Solution	Époque de référence	Période des observations	Nombre de points	RMS positions (mm)	RMS vitesses (mm/an)
VLBI					
SSC(GSFC) 97 R 01	93:001	79-97	120	5,8	1,9
SSC(GIUB) 97 R 01	93:001	84-96	43	13,6	0,5
SSC(NOAA) 95 R 01	93:001	79-94	111	14,7	1,9
SSC(JPL) 97 R 01	93:001	91-96	8	20,7	
SLR					
SSC(CSR) 96 L 01	93:001	76-96	89	11,1	3,8
SSC(GSFC) 97 L 01	86:182	80-96	38	10,9	1,7
GPS					
SSC(EMR) 97 P 01	96:001	95-97	36	10,0	3,5
SSC(GFZ) 97 P 02	94:365	93-96	66	16,8	3,3
SSC(CODE) 97 P 02	95:076	93-97	100	7,1	1,9
SSC(EUR) 97 P 04	96:090	95-96	39	2,4	0,3
SSC(EUR) 97 P 03	96:339	96-97	58	2,9	0,3
SSC(MIT) 97 P 01	97:151	94-97	132	8,5	9,2
SSC(NCL) 97 P 01	96:001	95-97	114	5,4	6,3
SSC(JPL) 97 P 02	96:001	91-96	113	9,4	3,8
DORIS					
SSC(GRGS) 97 D 01	93:001	93-96	48	26,9	8,0
SSC(CSR) 96 D 01	93:001	93-96	54	26,1	10,6
SSC(IGN) 97 D 04	93:001	90-97	62	28,3	12,8

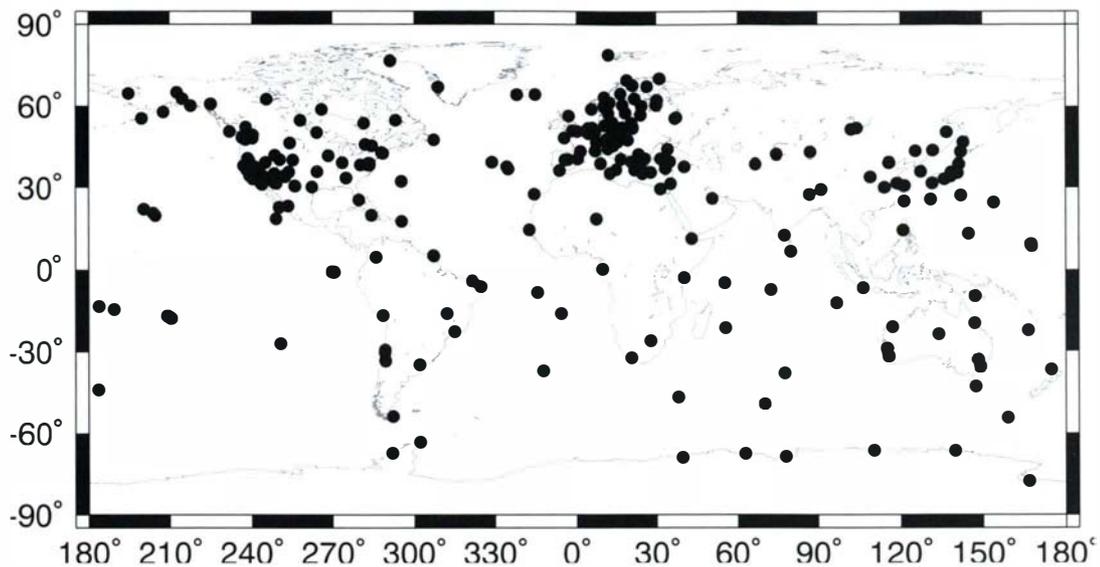


figure C.4.7.3 : répartition des sites ITRF96

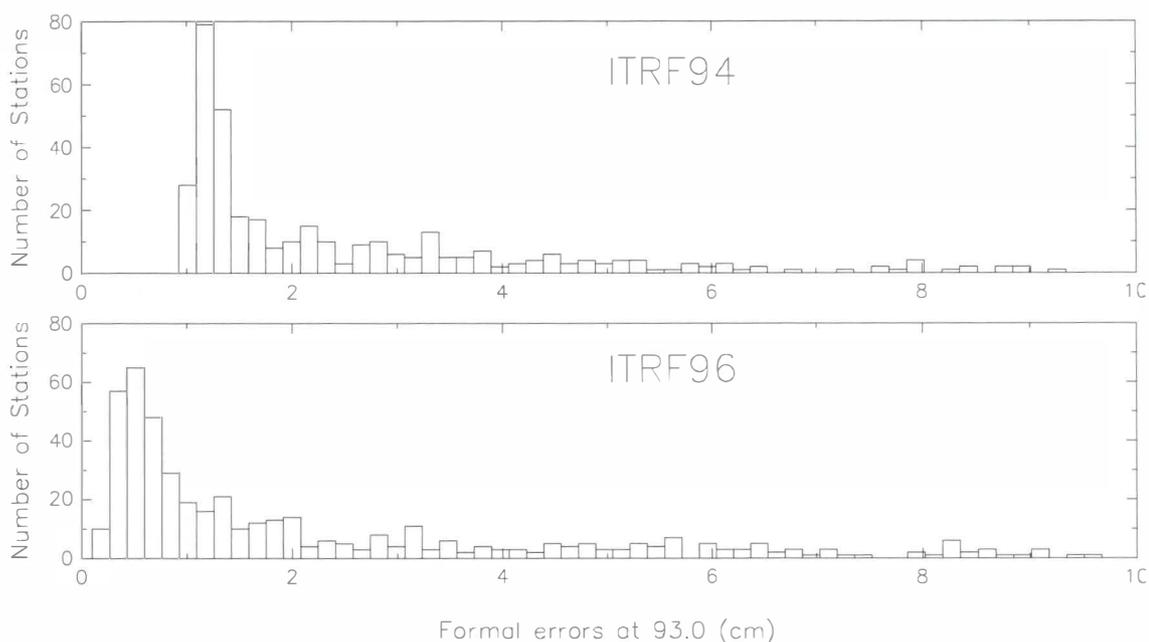


figure C.4.7.4 : erreurs formelles de positions ITRF94 et ITRF96

Maintenance du réseau IERS

C'est une activité de service scientifique qui regroupe les actions suivantes :

- Mise à jour de la base de données de géodésie spatiale par les nouveaux sites et points.
- Attribution des numéros DOMES pour les nouveaux points.
- Collecte, inventaire, mise à jour et analyse de qualité des rattachements entre les stations en collocation. C'est un élément central et de première importance dans les combinaisons de solutions de différentes techniques de manière générale, et dans les calculs ITRF en particulier. A ce titre, des rapports sur les rattachements utilisés dans l'ITRF94 et l'ITRF96 ont été publiés (voir bibliographie) soulignant les rattachements manquants, imprécis et douteux.

Traitements de séries temporelles de références terrestres

Dans une optique d'amélioration des réalisations des systèmes de référence terrestres, il nous a paru opportun d'envisager non plus seulement des réalisations annuelles de l'ITRF, mais aussi des réalisations à plus haute fréquence (mensuelles ou hebdomadaires) qui présentent l'avantage de ne pas imposer de postuler une dépendance temporelle linéaire de la position de la station terrestre, et donc de permettre, le cas échéant, des variations plus erratiques des stations. Ceci devrait déboucher sur une expérience pilote durant l'année 1998. En 1997, des études ont été menées sur

ce sujet dans le cadre d'une campagne, menée sous l'égide de l'IERS, et destinée à évaluer les variations du centre des masses de la Terre. Les résultats scientifiques de cette campagne sont assez mitigés [SILLARD et al 97]. Il n'en demeure pas moins qu'ils ont eu le mérite de souligner l'intérêt de ces nouvelles approches des systèmes de référence, et déboucheront certainement sur une nouvelle génération de réalisations.

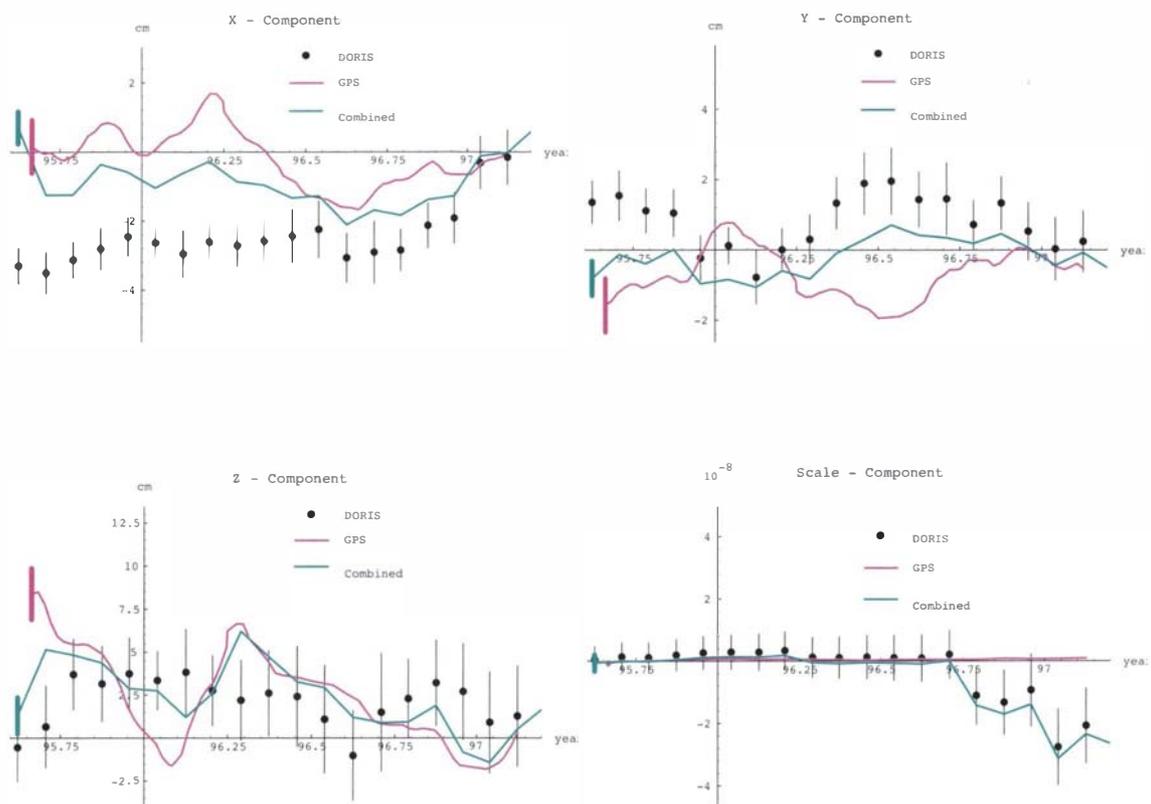


figure C.4.7.5

variations du géocentre et de l'échelle par analyse de séries temporelles de jeux de coordonnées DORIS et GPS

Les séries temporelles de jeux de coordonnées ont été obtenues par l'IGN, pour DORIS, et par le JPL pour le GPS. Ces séries ont été combinées à l'aide du logiciel développé pour la combinaison de l'ITRF. On constate que les variations d'origine du système de référence observées par Géodésie spatiale présentent une caractéristique annuelle, mais néanmoins incohérente entre chacune des techniques [SILLARD 97].

Publications

- [WILLIS 97] P. Willis : *Proposition de rapport pour les rattachements IERS*, Ref. LAREG 97-229, 1997.
- [ALTAMIMI 97] Z. Altamimi : *ITRF Report 2 on local ties*, August 25, 1997
- [ALTAMIMI 97] Z. Altamimi : *Report 1 on local ties*, May 23, 1997
- [BOUCHER 97] C. Boucher : *ITRF issues related to IGS*. IGS Governing Board, Business Meeting, Pasadena (USA), March 15 1997.
- [BOUCHER 97] C. Boucher : *ITRF past, present and future*, IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, Brazil, 1997.
- [BOUCHER et al 97]] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *The ITRF96 realization of the International Terrestrial Reference System*, in Proceedings of the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, Brazil, 1997.
- [SILLARD 97a] P. Sillard : *Combinaisons des jeux de coordonnées de géodésie spatiale : un exemple type d'estimation des composantes de la variance*, Journées GRGS «problèmes inverses et géodésie spatiale», Lyon (F), 16-17 janvier 1997.
- [SILLARD 97b] P. Sillard : *L'ITRF96 : méthode de calcul et résultats*, Journée sur la détermination d'orbite précise, 17 novembre 1997, Toulouse (F), 1997.
- [SILLARD 98] P. Sillard : *Analyse du champ de vitesses de l'ITRF96*, publication du LAREG, MM20, 1998.
- [SILLARD et al 97] P. Sillard, P. Willis & C. Boucher : *GPS and DORIS combined geocenter motion from reference frame time series analysis*, AGU Fall Meeting, 8-12 décembre 1997, San Francisco (USA), 1997.

C.4.8 Réseau GPS permanent

Claude Boucher

Contexte et Objectif

Dans le cadre du Groupe de travail permanent Positionnement statique et dynamique du CNIG, une réflexion a été menée sur les réseaux GPS permanents au niveau national. Afin de concrétiser cette réflexion, le Laboratoire de Recherche de Géodésie (LAREG) de l'IGN a entrepris en 1997 de réaliser une expérience pilote (RGP) comprenant :

- un réseau,
- un système de collecte, analyse et diffusion de données,
- un ensemble de projets pilote d'utilisation, définis et mis en œuvre avec divers partenaires.

Les objectifs assignés à cette expérience sont :

- de démontrer la faisabilité d'un réseau permanent à fins géodésiques ou de localisation précise (centimétrique) en temps différé et éventuellement réel (réseau actif dit RGA). Une telle étude peut faire significativement évoluer la programmation de l'équipement géodésique de base de notre territoire, comme d'autres pays sont d'ores et déjà en train de faire,
- de stimuler les intérêts scientifiques autour de ce réseau et ainsi de démontrer la nécessité de continuer son exploitation en tant que service à la communauté scientifique nationale. Ce réseau doit aussi naturellement s'insérer comme contribution nationale au réseau GPS permanent européen EUREF et par voie de conséquence au réseau mondial IGS. L'intérêt géophysique est évident. Une application particulière et qui rentre dans le programme de recherche du laboratoire LAREG est d'installer quelques stations en colocation avec des marégraphes en vue d'une détermination absolue et corrigée des mouvements verticaux du sol du niveau des mers et de ses variations à long terme (programme GLOSS de l'UNESCO),
- de stimuler des projets pilotes d'accompagnement.

Plusieurs sont déjà en cours de définition :

- applications topographiques, avec l'OGE (J. Berterreche),
- applications DGPS pour la navigation terrestre avec la DRAST, l'ENPC et le LCPC (F. Peyret),
- applications météo avec Météo France (G. Sommeria).

État d'avancement

Ce projet bénéficie de la coopération de plusieurs organismes sous diverses formes, notamment mise à dispositions de récepteurs ou fonctionnement : CNES, OCA, UMR Géoscience Azur, Météo France, SHOM

D'autres sont en cours de discussion ou à venir.

Un comité de pilotage est établi, afin de proposer les orientations les plus fructueuses de cette expérience et d'en suivre l'avancement et les résultats.

L'état du réseau se trouve dans le tableau ci-joint. Il faut particulièrement noter certaines coopérations nouvelles établies à cette occasion :

- avec le projet REGAL (réseau GPS permanent sur les Alpes, à objectifs géophysiques) piloté par E. Calais,
- avec Météo France pour l'utilisation de profils GPS de troposphère,
- avec le SHOM pour le projet SONEL et une participation commune à GLOSS (Marseille et Brest en particulier).

tableau C.4.8.1

Nom	Récepteur	Opérationnel	Inclus dans réseau
Brest (F)	IGN	début 1998	IGS SONEL PSMSL EUREF RGP
Grasse (F)	CNES	OK	IGS EUREF RGP
Le Mans (F)	ESGT	début 1998	EUREFRGP
Marseille (F)	IGN	début 1998	IGS SONEL PSMSL SELF EUREF RGP
Modane (F)	REGAL	début 1998	REGALRGPEUREF
Nantes (F)	ENPC/LCPC	mi 1998	RGPEUREF
Paris (F)	IGN	début 1998	RGPEUREF
St Jean des Vignes (F)	REGAL	OK	REGALRGPEUREF
Toulouse (F)	CNES	OK	IGS EUREF RGP

C.4.9 GPS cinématique

Pascal Willis

Contexte

Le système GPS permet désormais de localiser très précisément (quelques millimètres) des points géodésiques. Depuis peu, de nouvelles techniques de calculs, appelées méthodes cinématiques, se sont développées afin de permettre de conserver ces précisions, non seulement pour des points fixes mais aussi pour des objets en déplacement.

Objectif

Le but de cette recherche était de développer de nouvelles méthodes pour améliorer la fiabilité de ces processus (détection rapide de fautes éventuelles) et aussi d'augmenter leurs applications pour des objets à plus grande distance.

Réalisations et conclusions

Faute de moyens en personnel, cette recherche devait être réalisée en partie avec le concours d'un stagiaire. Aucun stagiaire n'ayant pu être trouvé en 1997 sur ce sujet particulier, cette recherche a été abandonnée *de facto* malgré l'intérêt réel de telles études.

Publications

[WILLIS 97] P. Willis : *Compte rendu de congrès*, Institute of Navigation, National Technical Meeting, Navigation and Positioning in the Information Age, IGN/LAREG CR 15, janvier 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Compte rendu de réunion «Civil GPS Service Interface Committee»*, Washington (USA), IGN/LAREG CR 20, mars 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Le système GPS de navigation par satellites*, in Revue de l'Electricité et de l'Electronique, REE, 6, pp. 48-54, juin 1997.

[WILLIS 97] P. Willis : *Compte rendu de réunion «Civil GPS Service Interface Committee»*, Kansas City (USA), IGN/LAREG CR 19, septembre 1997.

[WILLIS 97]] P. Willis : *Le système GPS : présentation générale*, Journée d'information SCETAURROUTE GPS, Applications aux travaux routiers, Saint-Quentin-en-Yvelines, IGN/LAREG CM046, octobre 1997.

Isabelle Melot

La liste suivante contient les références des publications issues du programme de recherche 1997. Elle reprend les références données dans les différents articles du Bulletin. On peut se procurer les publications en libre diffusion auprès du Service de la Recherche :

Service de la Recherche
Institut Géographique National

2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINTMANDÉCEDEX

téléphone : 01.43.98.83.19

télécopie : 01.43.98.81.71

courrier électronique : isabelle.melot@ign.fr

Thèses de doctorat

[BAILLARD 97] C. Baillard : *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains. Détection et caractérisation du sursol*, thèse de doctorat, ENST, laboratoire MATIS, IGN-SR 970005/C-THE, octobre 1997.

[BORDES 97] G. Bordes : *Interprétation d'images aériennes guidée par une base de données cartographiques : application à l'extraction automatique des routes*, thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 970001/C-THE, juin 1997.

[DEVOGELE 97] T. Devogele : *Processus d'intégration et d'appariement de Bases de Données Géographiques : application à une base de données routières multi-échelles*, Université de Versailles, laboratoire COGIT, IGN-SR 970025/S-THE, décembre 1997.

[DUQUESNOY 97] T. Duquesnoy : *Contribution de la Géodésie à l'étude des grands décrochements actifs associés à des zones de subduction à convergence oblique. Exemples de la Grande faille de Sumatra et de la faille Philippine*, thèse de l'Université Paris Sud-Orsay, Laboratoire OEMI, IGN-SR 97013/L-THE, 1997.

[FRITSCH 97] E. Fritsch : *Représentations de la géométrie et des contraintes cartographiques pour la généralisation du linéaire routier*, Université de Marne-La-Vallée, laboratoire COGIT, IGN SR 970008/S-THE, 1997.

[HABBIB 97] Habbib : *Précision d'un MNT régulier, 2ème partie de thèse*, Université P. & M. Curie, École nationale des sciences géographiques, IGN-SR 970008/R-THE, 1997.

[MONIER 97] P. Monier : *Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique. Application à la généralisation de l'orographie*, thèse de doctorat SIG, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, laboratoire COGIT, IGN-SR 970001/S-THE, juillet 1997.

[VAUGLIN 97] F. Vauglin : *Modèles statistiques des imprécisions géométriques des objets géographiques linéaires*, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 970021/S-THE, avril 1997.

[WÖPPELMANN 97] G. Wöppelmann : *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale*, thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, laboratoire LAREG, soutenue le 23 juin 1997.

Articles de journal scientifique

[BADARD, SPÉRY 97] T. Badard & L. Spéry : *Vers une méthode de propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques*, in Revue internationale de géomatique, laboratoire COGIT, IGN-SR 970035/S-ART, 1997.

[BOCK et al 97a] O. Bock, M. Kasser, C. Thom & J. Pelon : *Precise Relative Positioning by Wide - Angle Laser Ranging : First Ground-Based Experimental Results*, IEEE Tr. on Geoscience & Remote Sensing, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970003/L-ART, mars 1997.

[BOCK et al 97b] O. Bock, M. Kasser, C. Thom & J. Pelon : *Study of a Wide-Angle Laser Ranging for relative Positioning of Ground-Based Benchmarks Millimeter Accuracy*, in Journal of Geodesy, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970004/L-ART, 1997.

[DEVOGELE et al 98] T. Devogele, C. Parent & S. Spaccapietra : *On spatial database integration*, To appear in the International Journal on GIS (IJGIS), laboratoire COGIT, IGN-SR 980001/S-ART, 1998.

[HANGOUËT 97] JF. Hangouët : *Généralisation urbaine*, in Revue internationale de Géomatique, laboratoire COGIT, IGN-SR 970012/S-ART, 1997.

[LECORDIX et al 97] F. Lecordix, C. Plazanet & JP. Lagrange : *A Platform for Research in Generalization. Application to caricature*, in Geoinformatica 1 : 2 1997, pp. 161-181, laboratoire COGIT, IGN-SR 970022/S-ART, 1997.

[RUAS 97] A. Ruas : *An algorithm for displacement modelling in automated generalization*, in revue internationale de géomatique, laboratoire COGIT, IGN-SR 970013/S-ART, 1997.

- [RUAS 98] A. Ruas : *OEEPE Working Group on Generalisation*, in News letter 98, article à paraître, laboratoire COGIT, IGN-SR 980004/S-ART, 1998.
- [THOM, JURVILLIER 97a] C. Thom & I. Jurvillier : *An aerial digital frame camera for photogrammetry : radiometric comparison with scanned imagery*, in Geomatica, vol. 51 n° 2, pp 133-141, Association canadienne des sciences géomatiques, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970008/L-ART, 1997.
- [THOM, JURVILLIER 97b] C. Thom, I. Jurvillier : *An aerial digital frame camera for photogrammetry : radiometric comparison with scanned imagery*, in Geomatica, vol. 51, n° 2 (1997), pp. 133-141, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970008/L-ART, 1997.
- [UNGER 97] V. Unger : *PlaGe : Generalization Platform. Application to Road Caricature*, in Geoinformatica n° 2, laboratoire COGIT, IGN-SR 970003/S-ART, 1997.
- [VAUGLIN 97] F. Vauglin : *Statistical Representation of Relative Positional Uncertainty for Geographical Linear Features*. in Data Quality in Geographic Information-From Error to Uncertainty, Hermès (Ed), pp. 87-96, Paris, laboratoire COGIT, IGN-SR 970044/S-ART, 1997.
- [WEHRSTEDT, EGELS 97] Y. Wehrstedt & Y. Egels : *Pratique de l'aérotriangulation à l'IGN*, IGN-SR 970031/C-ART, à paraître dans le bulletin de la SFPT, laboratoire MATIS, IGN-SR 970031/C-ART, 1997.
- [WILLIS 97a] P. Willis : *Applications scientifiques du système DORIS*, in Revue XYZ, 73, 4, pp. 67-74, laboratoire LAREG, décembre 1997.
- [WILLIS 97b] P. Willis : *Le système GPS de navigation par satellites*, in Revue de l'Electricité et de l'Electronique, REE, 6, pp. 48-54, laboratoire LAREG, juin 1997.
- [WOODWORTH et al 97] P.L. Woodworth, T.F. Baker, G. Blewitt, C. Boucher & G. Wöppelmann : *A European Network for Sea Level and Coastal Land Level Monitoring*, in Journal of Marine Systems 13, pp. 163-171, laboratoire LAREG, 1997.

Communications en congrès

- [ALTAMIMI 98] Z. Altamimi : *IGS reference stations classification based on ITRF96 residual analysis*. IGS Workshop, Darmstadt, Germany, laboratoire LAREG, 9-11 february 1998.
- [BARRAULT 97] M. Barrault : *An automated System for Name Placement which Complies cartographic Quality Criteria : the hydrographic Network*, in actes de COSIT'97, Laurel Highlands, Pe, (USA), 15-18 octobre 1997, pp. 499-500, laboratoire COGIT, IGN-SR 970024/S-COM, octobre 1997.
- [BOCK et al 97a] O. Bock, M. Kasser, C. Thom & J. Pelon : *Wide-Angle Airborne Laser Ranging for Precise Relative Positioning : Ground-Based Experiments & Aerial Simulations*, in actes d'Aerospace Remote Sensing/Laser Radar Techniques, Londres (UK), Laboratoire OEMI, IGN-SR 970005/L-COM, septembre 1997.
- [BOCK et al 97b] O. Bock, M. Kasser & C. Thom : *A Wide-Angle Airborne Laser Ranging System for Millimeter Accuracy Subsidence Measurements*, in actes d'EOS Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements & Applications, Nantes (F), Laboratoire OEMI, IGN-SR 70006/L-COM, juillet 1997.
- [BORDES et al 97a] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *An Automatic Road extraction from Grey-Level Images based on Object Database*, in Actes du congrès SPIE Aerosense, SPIE vol. 3072, Orlando (USA), laboratoire MATIS, IGN-SR 970020/C-COM, avril 1997.
- [BORDES et al 97b] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Road modeling Based on a Cartographic Database for Aerial Image Interpretation*, in actes du séminaire "Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps", Birkhäuser Verlag, Bonn (D), laboratoire MATIS, IGN-SR 970023/C-COM, mai 1997.
- [BOTTON et al 97] S. Botton, M. Rothacher, T. Springer & G. Beutler : *Reprocessing of about 15 months of global IGS data using improved orbit model*. EGS, Vienna, laboratoire LAREG, April 1997.
- [BOUCHER 97a] C. Boucher : *ITRF issues related to IGS*, IGS Governing Board, Business Meeting, Pasadena, USA, laboratoire LAREG, March 15 1997.
- [BOUCHER 97b] C. Boucher : *ITRF past, present and future*. Scientific Assembly of the IAG, Rio de Janeiro, Brésil, laboratoire LAREG, September 1997
- [BOUCHER et al 97] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *The ITRF96 realization of the International Terrestrial Reference System*, papier présenté à l'Assemblée Scientifique de l'Association Internationale de Géodésie, Rio de Janeiro, Brésil, laboratoire LAREG, septembre 1997.
- [BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi, P. Sillard : *ITRF96 and follow on for 1998*, IGS workshop, Darmstadt (D), laboratoire LAREG, 9-11 february 1998.
- [DESEILLIGNY et al 97a] M. Pierrot Deseilligny & R. Mariani : *A three year project on topographic maps interpretation*, in actes du Second IAPR Workshop on Graphics Recognition, p. 160-167, laboratoire MATIS, IGN-SR 970012/C-COM, 1997.
- [DESEILLIGNY et al 97b] M. Pierrot Deseilligny, F. Dupont & H. Le Men : *Automatic Interpretation of Contour Lines Out of Scanned Maps : an a priori Topological Knowledge Based Approach*, in actes d'International Conference on Document Analysis and Recognition, p. 91, laboratoire MATIS, IGN-SR 970024/C-COM, 1997.
- [DEVOGELE 97] T. Devogele : *Les SIG multi-représentations : Applications et Systèmes*, in actes d'Informatique pour l'environnement, Umweltinformatik'97, Metropolis, Strasbourg (F), Geiger, Jaeschke, Rentz, Simon Spengler, Zilliox Zunder (Eds.), pages 678-687, laboratoire COGIT, IGN-SR 970009/S-COM, 1997.
- [DUPONT et al 97] F. Dupont, M. Pierrot Deseilligny & M. Gondran : *Automatic Interpretation of Scanned Maps : Reconstruction of Contour Lines*, in actes du Second IAPR Workshop on Graphics Recognition, p. 193-200, laboratoire MATIS, IGN-SR 970011/C-COM, 1997.
- [FRITSCH 97a] E. Fritsch : *Line generalization based on curvature*, in actes d'AUTOCARTO 13, 9-10 avril 1997, Seattle, OR (USA), laboratoire COGIT, IGN-SR 970006/S-COM, 1997.
- [FRITSCH 97b] E. Fritsch : *Un algorithme de généralisation du linéaire basé sur le lissage de la courbure*, in actes de l'ACI'97, 22-28 juin 1997, Stockholm (S), laboratoire COGIT, IGN-SR 970007/S-COM, 1997.

- [HANGOUËT, DJADRI 97] J-F. Hangouët & Djadri : *Voronoi Diagrams on Line Segments : Measurements for contextual Generalization Purposes*, in actes de COSIT'97, Laurel Highlands, Pennsylvanie (USA), 15-18 octobre 1997, pp 207-222, laboratoire COGIT, IGN-SR 970039/S-COM, octobre 1997.
- [HARVEY, VAUGLIN 97] F. Harvey & F. Vauglin : *No fuzzy creep ! A clustering algorithm for controlling arbitrary node movement*, in actes d'Autocarto 13, ACSM ASPRS, Annual Convention, Seattle, WA (USA), pp. 317-326, 7-10 avril 1997, laboratoire COGIT, IGN-SR 970029/S-COM, 1997.
- [JAMET 97] O. Jamet : *Comparaison vecteur-images pour la détection des changements du thème Bâti de la BDTopo*, in actes des Journées de la Recherche de l'IGN, laboratoire MATIS, IGN-SR 970025/C-COM, mars 1997.
- [JUNG et al 97] F. Jung, B. Jedynak & D. Geman : *Recognizing Buildings in Aerial Images*, in actes de l'Ascona Workshop, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), Birkhäuser, Basel (CH), laboratoire MATIS, IGN-SR 970021/C-COM, 1997.
- [LEMARIÉ, BUCAILLE 97] C. Lemarié & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, Clermont-Ferrand (F), 20-22 janvier 1998, in actes du 11ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA'98), volume 2, pp. 397-406, laboratoire COGIT, IGN-SR 970026/S-COM, 1998.
- [MARIANI et al 97a] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, J. Labiche & R. Mullot : *Linear Texture Segmentation Using Elastic Model Matching. Application to Geographic Maps Understanding*, in actes de Pattern Recognition, laboratoire MATIS, IGN-SR 970010/C-COM, 1997.
- [MARIANI et al 97b] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, J. Labiche & R. Mullot : *Linear Texture Segmentation using Elastic Model Matching. Application for Geographic Maps Understanding*, in actes du Second IAPR Workshop on Graphics Recognition, p. 201, laboratoire MATIS, IGN-SR 970010/C-COM, 1997.
- [MARIANI et al 97] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, J. Labiche & R. Mullot : *Algorithms for the hydrographic Network Names Association on Geographic Maps*, in actes de l'International Conference on Document Analysis and Recognition'97, p. 362, laboratoire MATIS, IGN-SR 970022/C-COM, 1997.
- [MARIANI et al 98] R. Mariani, F. Lecourt, M. Pierrot Deseilligny, J. Labiche & Y. Lecourtier : *Interprétation de cartes géographiques : Algorithmes de reconstruction des réseaux hydrographiques et routiers*, Traitement du Signal, laboratoire MATIS, IGN-SR 980001/C-COM, 1998.
- [MEAS YEDID 97] V. Meas Yedid, M. Pierrot Deseilligny & G. Stamon : *First level map interpretation contribution to vegetal representation*, in actes du Second IAPR Workshop on Graphics Recognition, p. 225, laboratoire MATIS, IGN-SR 970026/C-COM, 1997.
- [MORISSET, RUAS 97] Morisset & A. Ruas : *Road hierarchization for generalization by means of multi-agents and simulation*, in actes de l'ACI'97, 22-28 juin 1997, Stockholm (S), laboratoire COGIT, IGN-SR 970015/S-COM, 1997.
- [RUAS, MACKANESS 97] A. Ruas & W. Mackaness : *Strategies in generalization*, in actes de l'ACI'97, 22-28 juin 1997, Stockholm (S), laboratoire COGIT, IGN-SR 970014/S-COM, 1997.
- [SILLARD 97a] P. Sillard : *Combinaisons des jeux de coordonnées de géodésie spatiale : un exemple type d'estimation des composantes de la variance*, Journées GRGS «problèmes inverses et géodésie spatiale», Lyon (F), laboratoire LAREG, 16-17 janvier 1997.
- [SILLARD 97b] P. Sillard : *L'ITRF96 : méthode de calcul et résultats*, Présentation à la Journée sur la détermination d'orbite précise, Toulouse, Publications du LAREG, Série Communication CM 45, 24 p, 17 novembre 1997.
- [SILLARD et al 97] P. Sillard, P. Willis & C. Boucher : *GPS and DORIS Combined Geocenter Motion from Reference Frame Time Series Analysis*, in actes de l'American Geophysical Union, San Francisco (USA), IGN/LAREG CM051, décembre 1997.
- [THOM, JURVILLIER 97a] C. Thom & I. Jurvillier : *The aerial digital camera project*, in actes de third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, ERIM, vol. II, pp. 243-248, Copenhague (DK), 7-10 juillet 1997, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970007/L-COM, 1997.
- [THOM, JURVILLIER 97b] C. Thom & I. Jurvillier : *Current Status on the Digital Camera IGN*, in actes de la 46th Photogrammetric Week'97, Stuttgart (D), 22-26 septembre 1997, pp. 75-78, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970009/L-COM, 1997.
- [TIMPF, DEVOGELE 97] S. Timpf & T. Devogele : *New Tools for Multiple Representations*, in actes d'ICC'97, Stockholm (S), pp. 1381-1386, laboratoire COGIT, IGN-SR 970046/S-COM, 1997.
- [UNGER 97] V. Unger : *PlaGe : Generalization Platform. Application to Road Caricature*, in actes de l'ACI'97, 22-28 juin 1997, Stockholm (S), laboratoire COGIT, IGN-SR 970004/S-COM, 1997.
- [WILLIS 97a] P. Willis : *Applications scientifiques du système DORIS*, présentation au séminaire du Bureau des Longitudes, Paris (F), IGN/LAREG CM043, avril 1997.
- [WILLIS 97b] P. Willis : *Localisation DORIS à l'IGN*, Groupe de Revue d'exploitation des missions DORIS/SPOT et TOPEX/POSEIDON, Toulouse (F), IGN/LAREG CM037, 29 janvier 1997.
- [WILLIS 97c] P. Willis : *The International GLONASS Experiment (IGEX)*, in actes du ION Meeting, GPS97, IGN/LAREG CM 047, septembre 1997.
- [WILLIS 97d] P. Willis : *Le système GPS : présentation générale*, in actes de la Journée d'information SCETAUROUTE GPS, Applications aux travaux routiers, Saint-Quentin-en-Yvelines, IGN/LAREG CM046, octobre 1997.
- [WILLIS 97e] P. Willis : *Positionnement par satellites*, réunion du 25 novembre 1997 du CNIG, laboratoire LAREG, 1997.
- [WILLIS et al 97a] P. Willis, C. Boucher & P. Sillard : *Geodetic Reference Frames for Future Altimetric Missions*, in actes du JASON Science Working Team meeting, Baltimore (USA), IGN/LAREG CM044, mai 1997.
- [WILLIS et al 97b] P. Willis, C. Boucher, L. Morel, P. Sillard, G. Wöppelmann, J-P. Berthias, S. Houry & A. Piuze : *Geodetic References for Future Altimetric Missions*, Réponse à l'Appel à Participation NASA/CNES, in actes du Groupe de Travail Scientifique JASON-1, IGN/LAREG 97.647, décembre 1997.
- [WILLIS et al 97c] P. Willis, P. Sillard & C. Boucher : *Processing DORIS/IERS Data in a Free-Network Approach for Geocenter Variations Monitoring*, in actes d'American Geophysical Union, San Francisco (USA), IGN/LAREG CM051, décembre 1997.
- [WILLIS, ZUMBERGE 97] P. Willis & J. Zumberge : *Estimation of the tropospheric delay using the DORIS system in a multi-satellite mode*, in actes de IAPSO/IAMAS Conference, Melbourne, Australie, juillet 1997, IGN/LAREG CM 044.

Rapports de stage

- [ARNIM 97] A. von Arnim : *Utilisation de modèles numériques d'élévation pour la détection de routes sur images aériennes*, stage de DEA, laboratoire MATIS, IGN-SR 970007/C-STA, septembre 1997.
- [BEL HADJ ALI 97] A. Bel Hadj Ali : *Appariement géométrique des objets géographiques et étude des indicateurs de qualité*, stage de DEA SIG de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 970010/S-STA, 18 septembre 1997.
- [BENZENATI 97] A. Benzenati : *Approximation des profondeurs d'une scène urbaine à partir d'images à grande échelle*, 54 pages, stage de DESS, Université P. & M. Curie, laboratoire MATIS, IGN-SR 970003/C-STA, 30 septembre 1997.
- [BRANLY 97] P. Branly : *Mise en place d'un processus d'appariement dans le cadre de l'intégration des bases de données BD TOPO et Géoroute*, stage de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, CNAM, laboratoire COGIT, IGN-SR 970030/S-STA, juin 1997.
- [BUCAILLE 97] O. Bucaille : *Mise à jour d'une Base de Données Géographiques - Exemple de la BD CARTO à l'Institut Géographique National*, stage d'Ingénieur CNAM : "Bases de Données Avancées", laboratoire COGIT, IGN-SR 970002/S-STA, février 1997.
- [COUJET 97] P. Coujet : *Etude d'un outil de bruitage de la qualité de données géographiques*, stage de DESS, laboratoire COGIT, IGN-SR 970042/S-STA, juillet-décembre 1997.
- [DORIE 97] O. Dorie : *Recherche d'une procédure optimale pour transformer les coordonnées mensuelles DORIS dans un système de référence mondial maintenu de manière fiable dans le temps*, stage de DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS 6, juin 1997.
- [FERRIER 1997] R. Ferrier : *Détection des ombres dans les images aériennes*, stage de DESS, laboratoire MATIS, IGN-SR 970006/C-STA, septembre 1997.
- [GRAMIER 97] R. Gramier : *Modélisation et estimation du frottement atmosphérique sur les satellites SPOT-2 et SPOT-3 dans le cadre du système DORIS*, stage de DEA, Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS7, juin 1997.
- [GURLINGER 97] G-H. Gurlinger : *Applications de GLONASS en Géodésie et Topographie*, stage de l'ENSG, IGN/LAREG MS8, septembre 1997.
- [HERGOTT 97] B. Hergott : *Placement automatique des noms de surfaces*, stage DESS intelligence artificielle Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 970042/S-STA, septembre 1997.
- [LEMOINE 97] S. Lemoine : *Restitution de bâtiments à l'aide de données externes sur images aériennes*, 42 pages, laboratoire MATIS, IGN-SR 970017/C-STA, 30 septembre 1997.
- [MAUGER 97] F. Mauger : *Hiérarchisation d'un réseau routier de talwegs en vue de sa généralisation*, stage du DESS Application de l'Informatique aux Sciences de la Terre, laboratoire COGIT, IGN-SR 970032/S-STA, octobre 1997.
- [OUSSET 97] O. Ousset : *Contrôle de cohérence et migration de données géographiques dans une base de données intégrée*, stage du DESS AIST, LIST, Université Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 970036/S-STA, octobre 1997.
- [REYNES 97] J.-L. Reynes : *Sélection du réseau routier en vue de sa généralisation*, DESS "Application de l'informatique aux Sciences de la Terre, Université P & M. Curie, laboratoire COGIT, IGN-SR 970043/S-STA, 1997.
- [THIERRY 97] F. Thierry : *Élaboration d'une interface homme-machine pour l'étude de modèles paramétriques de bâtiments sur des couples stéréoscopiques d'images à grande échelle*, 27 pages, laboratoire MATIS, IGN-SR 970004/C-STA, 31 octobre 1997.
- [ZEROUAL, SAIDI 97] I. Zeroual & Saidi : *Approche méthodologique pour l'évaluation de la qualité dans une base de données géographiques numérique*, stage de formation du Centre National des Techniques Spatiales (CNTS) d'Arzew, laboratoire COGIT, IGN-SR 970018/S-STA, janvier 1997.

Rapports internes et comptes rendus

- [BADARD 97] T. Badard : *Étude de la propagation des mises à jour dans une base de données multi-représentations par analyse des changements géographiques*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970023/S-RAP, juillet 1997.
- [JAMET 97a] O. Jamet : *Probabilisation de l'espace des hypothèses 3-D dans un processus de mise en correspondance - Approche théorique*, laboratoire MATIS, IGN-SR 970027/C-RAP, 30 juin 1997.
- [JAMET 97b] O. Jamet : *Construction d'une loi de probabilité sur l'ensemble des surfaces possibles - premiers résultats expérimentaux*, laboratoire MATIS, IGN-SR 970028/C-RAP, 15 juillet 1997.
- [JAMET 97c] O. Jamet : *Comparaison Vecteur-Image pour la Détection des Changements : Application à la mise à jour du thème bâti de la BDTopo*, compte rendu annuel de thèse, laboratoire MATIS, IGN-SR 970029/C-RAP, septembre 1997.
- [LEMARIÉ 97] C. Lemarié : *Étude de l'appariement géométrique Cadastre/BDTopo*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970019/S-RAP, janvier 1997.
- [LEMARIÉ, BUCAILLE 97] C. Lemarié & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970026/S-RAP, juillet 1997.
- [NOCQUET 97a] J-M. Nocquet : *Compte rendu de la réunion du sous-groupe de travail du CNIG "Conversion Altimétrique RGF93-IGN69"*, IGN/LAREG CR 22, 1er décembre 1997.
- [NOCQUET 97b] J-M. Nocquet : *Conversion RGF93-IGN69, premières comparaisons et résultats préliminaires*, compte rendu de la présentation faite au Groupe de Travail Permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique" du 5 juin 1997, laboratoire LAREG, 1997.
- [RAYNAL, JOLIVET 97] L. Raynal & P. Jolivet : *COMMUTER , COoperative MULTIdimensional*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970020/S-RAP, 22 janvier 1997.

- [SOUCHON, THOM 97] JP. Souchon & C. Thom : *Compte rendu de la troisième mission de la Nouvelle Caméra Numérique*, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970010/L-RAP, octobre 1997.
- [SOUCHON, THOM 97a] JP. Souchon & C. Thom : *Compte rendu de la mission aérienne des caméras numériques de l'IGN sur Le Mans (F)*, Laboratoire OEMI IGN-SR 970011/L-RAP, 10 septembre 1997.
- [SOUCHON, THOM 97b] JP. Souchon & C. Thom : *Chaîne de traitement des images numériques couleur*, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970012/L-RAP, 1er décembre 1997.
- [THOM 97] C. Thom : *Rapport d'étude pour la réalisation d'un photomètre embarqué*, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970002/L-RAP, 10 juin 1997.
- [THOM, SOUCHON 97a] C. Thom & JP. Souchon : *Compte rendu de la mission aérienne des caméras numériques de l'IGN sur Le Mans*, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970011/L-RAP, 10 septembre 1997.
- [THOM, SOUCHON 97b] C. Thom & JP. Souchon : *Chaîne de traitement des images numériques couleur*, Laboratoire OEMI, IGN-SR 970012/L-RAP, octobre 1997.
- [WEHRSTEDT 97] Y. Wehrstedt : *Étude préalable d'une boîte à outils de photogrammétrie pour le laboratoire MATIS*, laboratoire MATIS, IGN-SR 970030/C-RAP, 1997.
- [WILLIS 97] P. Willis : *Compte rendu de mission au Jet Propulsion Laboratory (JPL/USA)*, IGN/LAREG CR 14, janvier 1997.
- [WILLIS 97a] P. Willis : *Compte rendu de congrès, Institute of Navigation*, National Technical Meeting, Navigation and Positioning in the Information Age, IGN/LAREG CR 15, janvier 1997.
- [WILLIS 97b] P. Willis : *Compte rendu de réunion «Civil GPS Service Interface Committe»*, Washington (USA), IGN/LAREG CR 20, mars 1997.
- [WILLIS 97c] P. Willis : *Compte rendu de réunion «Civil GPS Service Interface Committee»*, Kansas City (USA), IGN/LAREG CR 19, septembre 1997.
- [WILLIS 97d] P. Willis : *Compte rendu du Groupe de Travail Permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique" du 7 mars 1997*, IGN/LAREG CR 16, 1997.
- [WILLIS 97e] P. Willis : *Compte rendu du Groupe de Travail Permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique" du 5 juin 1997*, IGN/LAREG CR 18, 1997.
- [WILLIS 97f] P. Willis : *Proposition de rapport pour les rattachements IERS*, Réf. LAREG 97-229, 1997.
- [WILLIS et al 97] P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R. Neilan & J. Slater : *The International GLONASS Experiment (IGEX-98)*, International Call For Participation, version 1 (préliminaire), laboratoire LAREG, décembre 1997.
- [WÖPPELMANN 97] G. Wöppelmann : *Compte rendu de l'exploitation des données de l'étalonnage du marégraphe de Marseille du 10 décembre 1996*, laboratoire LAREG, 1997.

Manuels et documentation

- [ALTAMIMI 97a] Z. Altamimi : *Analyse d'un logiciel de combinaison de positions et vitesses tridimensionnelles*, publication du laboratoire LAREG MM017, laboratoire LAREG, 1997.
- [ALTAMIMI 97b] Z. Altamimi : *ITRF Report 2 on local ties*, laboratoire LAREG, August 25, 1997.
- [ALTAMIMI 97c] Z. Altamimi : *Report 1 on local ties*, laboratoire LAREG, May 23, 1997.
- [BADARD 97] T. Badard : *Documentation - Mise à jour de la BD CARTO*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970027/S-MAN, 1997.
- [BEAUCE 97] V. Beauce : *Géo2, Documentation utilisateur*, version 2.0, laboratoire COGIT, IGN-SR 970028/S-MAN, mai 1997.
- [BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *Results and analysis of the ITRF96*, rapport technique 24, Int. Earth Rotation Serv., laboratoire LAREG, 1998.
- [BOUCHER 97] C. Boucher : *ITRF past, present and future*, IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, Brazil, laboratoire LAREG, 1997.
- [CHIRIÉ 97] F. Chirié : *Placement automatique des noms de rues*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970016/S-MAN, 1997.
- [NOCQUET 97] J-M. Nocquet : *Liste d'outils en vue de l'étude d'évaluation des modèles de conversion entre les systèmes RGF93 et IGN69*, IGN/LAREG CR 17, 1997.
- [SILLARD, ALTAMIMI 97] P. Sillard & Z. Altamimi : *Manuel de description et d'utilisation du logiciel CATREF*, publication du laboratoire LAREG SP005, laboratoire LAREG, 1997.
- [WILLIS 97] P. Willis : *Notice utilisateur du logiciel GIPSY/OASIS pour les calculs DORIS à l'IGN, version 1*, IGN/LAREG SP7, laboratoire LAREG, février 1997.

Cours

- [DUQUENNE 97] H. Duquenne : *Champ de pesanteur, géoïde et altimétrie : concepts fondamentaux*, DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, Cycles d'Ingénieurs de l'ENSG, Module de formation ENSG "Notions fondamentales en Géodésie", Saint-Mandé (F), janvier 1997.
- [DUQUENNE 97a] F. Duquenne : *Recueil d'exercices d'astro-géodésie exercices proposés aux cycles G1, IT1, IG1 et au DEA SIG, MPT de 1991 à 1997*, IGN, École nationale des sciences géographiques, Marne-la-Vallée, 1997.
- [DUQUENNE 97b] F. Duquenne : *Recueil d'exercices d'astro-géodésie, exercices proposés aux cycles G1, IT1, IG1 et au DEA SIG, MPT, de 1991 à 1997*, IGN, École nationale des sciences géographiques, Marne-la-Vallée, juin 1997.

Erratum

Dans le bulletin d'information de l'IGN n°68, les images de la page 14 ont été permutées avec d'autres images. Les images véritables sont ci-dessous. Veuillez nous excuser de cette confusion.

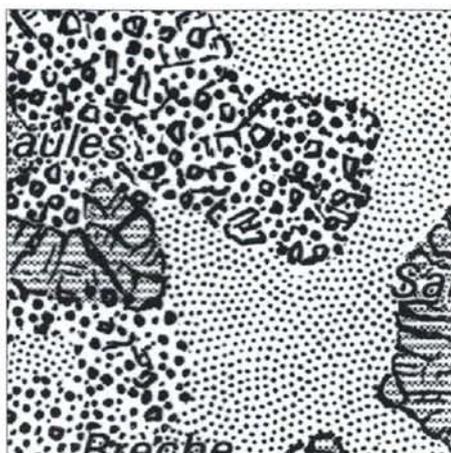
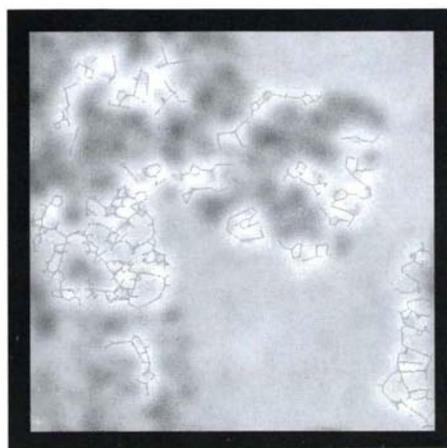
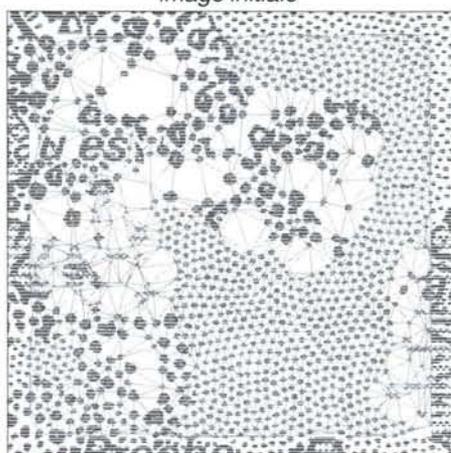


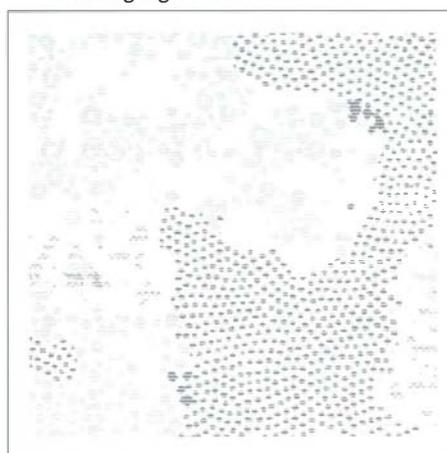
image initiale



lissage gaussien et contours



triangulation de Delaunay



segmentation

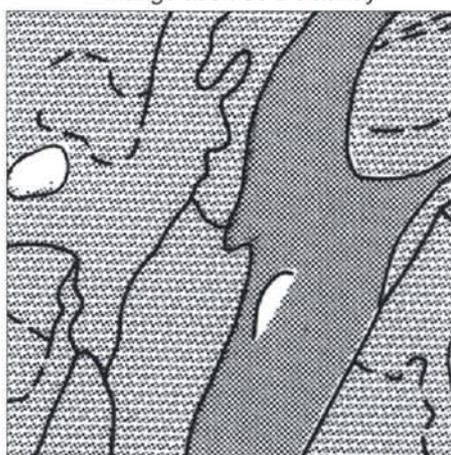
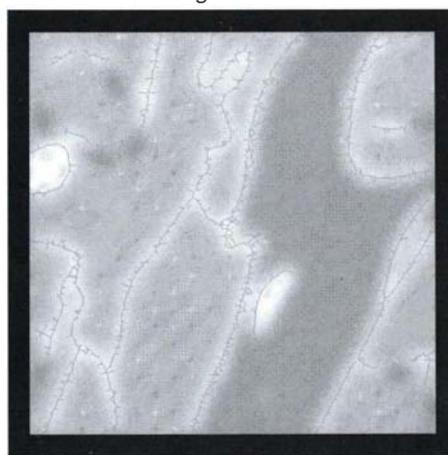


image initiale



lissage gaussien et contours



triangulation de Delaunay



segmentation

Directeur de la Publication : Jacques Poulain
Rédacteur en Chef : Serge Motet

Imprimé à l'IGN

© Institut Géographique National

136 bis rue de Grenelle
F-75700 Paris 07 SP

Tél. 01.43.98.80.00

Imprimerie de l'Institut Géographique National

Dépot légal 3e trimestre 1998

N° d'édition : 179 - n° d'impression : 200

