



HAL
open science

La recherche à l'IGN : activité 1999

Serge Motet, Olivier de Joinville, Didier Boldo, Nicolas Paparoditis, Ibtissam Baghli, Christian Thom, Ali Atef Bel Hadj, Jean-Daniel Piquet Pellorce, Jocelyn Marchadier, Hassan Jibrini, et al.

► **To cite this version:**

Serge Motet, Olivier de Joinville, Didier Boldo, Nicolas Paparoditis, Ibtissam Baghli, et al.. La recherche à l'IGN : activité 1999. Bulletin d'information de l'IGN N°71. 2000. hal-02372743

HAL Id: hal-02372743

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372743>

Submitted on 20 Nov 2019

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

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

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

Activité 1999

La recherche en 1999

01 Classement IGN-SR : **00-001/R-LIV**

02 Livre

03 Nom et adresse du directeur de la publication :

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

04 Rédacteur en chef : 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 1999**

07 Date d'édition : 2000

13 Numéro 71

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

Abonnement gratuit & courrier, s'adresser à :

Isabelle Melot
IGN, Direction Technique
2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDÉ CEDEX

téléphone : (33) 1 43 98 83 19 - télécopie : (33) 1 43 98 81 71
isabelle.melot@ign.fr

Résumé

Ce numéro dresse le bilan des recherches menées à l'Institut Géographique National au cours de l'année 1999. Il traite plus particulièrement des modèles numériques en trois dimensions, constitués à partir d'images aériennes, de leur évaluation, de leur production en milieu urbain et de leur utilisation pour les ortho-photographies. Il traite également des mesures pour comparer des objets surfaciques.

Mot-clé principal : Information géographique.

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

En couverture :

Schéma de principe d'une nouvelle méthode de corrélation multi-images, pour la production simultanée de modèles numériques d'élévation et d'ortho-images. Elle est fondée sur des images avec un fort recouvrement. Voir l'article B.3 pour la description du traitement et les avantages de cette méthode par rapport à l'analyse classique de couples stéréoscopiques.

A	La recherche à l'IGN	1
<hr/>		
B	Quelques actions marquantes	5
B.1	Création de cartes d'évaluation d'un modèle numérique de surface (MNS)	5
B.2	Vers l'orthophotographie avec bâtiments redressés	17
B.3	Reconstruction de Modèles Numériques de Surfaces en zone urbaine à partir de prises de vues aériennes numériques à fort recouvrement	27
B.4	Mesures entre objets surfaciques : application à la qualification des liens d'appariement	33
<hr/>		
C.	Bilan des actions de recherche	55
C.1	Image et photogrammétrie	55
C.1.1	Correction et modélisation des ombres	55
C.1.2	Conception et mise en œuvre d'algorithmes pour la restitution 3-D	55
C.1.3	Modèle numérique d'élévation et orthophotographie	56
C.1.4	Appariement d'un modèle 3-D de site urbain et de clichés terrestres haute résolution	57
C.1.5	Reconstruction du bâti pour la cartographie à grande échelle	59
C.1.6	Reconstruction de modèles de bâtiments à partir de données cadastrales vectorisées et d'un couple d'images aériennes à haute résolution	60
C.1.7	Multi-corrélations ponctuelles sur Le Mans	62
C.1.8	Reconstruction du bâti pour la cartographie à grande échelle	65
C.1.9	Restitution automatique des carrefours routiers guidée par la BD Carto	65
C.1.10	Détection de changements par comparaison image-image	67
C.1.11	Détection de changements pour la mise à jour du réseau routier	67
C.1.12	Détection de changements : comparaison et fusion de segmentations d'images aériennes multidates	68
C.1.13	Extraction et interprétation des courbes de niveau sur carte scannée	70
C.2	Instrumentation	71
C.2.1	Développements de caméras aériennes numériques	71
C.2.2	Essais aéroportés du télémètre laser aéroporté	73
C.2.3	Systématismes des prises de vue aériennes et trajectographie	76
<hr/>		

Table des matières

C.3	SIG et cartographie	77
C.3.1	Appariement de données géographiques	77
C.3.2	Qualité des bases de données géographiques	78
C.3.3	Mécanismes de mise à jour entre Bases de Données Géographiques	82
C.3.4	Interopérabilité	84
C.3.5	Nouvelles représentations	85
C.3.6	Généralisation contextuelle	86
C.3.7	Généralisation des réseaux	93
C.3.8	Apprentissage d'une base de règles pour la généralisation	95
C.4	Géodésie 97	
C.4.1	Le Repère International de Référence Terrestre (ITRF)	97
C.4.2	Traitement de données GPS en Antarctique : mouvements crustaux, rebond post-glaciaire et systèmes de référence	98
C.4.3	Élaboration d'une série temporelle de l'ITRS	100
C.4.4	Amélioration des processus de compensation des données de nivellement	102
C.4.5	Mesures de déformation dans les Alpes	102
C.4.6	Nivellement par GPS	103
C.4.7	Mesure de la déformation actuelle dans les Alpes et l'Europe occidentale. Utilisation géodésique d'un réseau de stations GPS permanentes	107
C.4.8	Positionnement DORIS	108
C.4.9	GNSS et GLONASS	110
C.4.10	JASON	111
C.4.11	Niveau moyen des mers : suivi par les techniques modernes de géodésie et de marégraphie	112
C.4.12	Réseau GPS Permanent	118
C.4.13	Groupement de Recherche AGRET	119
C.4.14	Astrogéodésie VLBI	120

D.	Publications	123
	Thèses de doctorat	123
	Articles de journal scientifique	123
	Communications en congrès	123
	Rapports de stages	126
	Rapports internes et comptes rendus	127

Serge Motet

Ce numéro du Bulletin d'information de l'IGN présente un bilan des recherches menées en 1999. L'année 1999 est une année charnière pour la recherche à l'IGN, puisque de nouvelles orientations seront données en 2000.

Au cours des années précédentes, les thèmes de recherche visaient principalement le développement et l'automatisation des nouvelles filières numériques. Cette orientation est préservée et il reste beaucoup à faire.

Dans les prochaines années, une part de l'activité se reportera sur des recherches dont la finalité est l'usage de l'information géographique. On trouve, déjà dans ce numéro, des articles qui ressortissent à cette nouvelle orientation. Notre objectif est d'analyser et d'illustrer ce qui fera la valeur de l'information géographique, soit, au travers des applications, soit, grâce aux nouvelles technologies

Ce bulletin conserve la structure des comptes rendus des années précédentes. On trouvera ci-dessous, une présentation générale de la recherche à l'IGN. La seconde partie (B) du bulletin présente dans des articles détaillés, certains des progrès marquants de 1999. la troisième partie (C) est un bilan exhaustif mais sommaire de l'activité à l'IGN. Enfin, la partie D contient la liste des publications.

Organisation de la recherche

La recherche à l'IGN s'articule autour de quatre disciplines. À chaque discipline correspond un laboratoire :

- Le laboratoire MATIS aborde les domaines du traitement d'*images* et de la *photogrammétrie*. Il travaille sur les plans scannés et surtout sur les photographies aériennes. Il étudie la restitution en trois dimensions par stéréoscopie.
- Le laboratoire OEMI est le laboratoire d'*instrumentation* de l'IGN. Son action principale est le développement de caméras aéroportées, fondées sur des capteurs CCD de grande dimension et produisant directement des images numériques.
- Le laboratoire COGIT travaille sur les *bases de données localisées* et en *cartographie*.
- Le laboratoire LAREG est le laboratoire de *géodésie*. Il est spécialisé dans la détermination de références géodésiques et altimétriques.

Les laboratoires se situent sur deux pôles :

- à Marne La Vallée (77) se trouve le laboratoire LAREG, rattaché à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG),
- à Saint-Mandé (94), le Service de la Recherche regroupe les laboratoires COGIT, LOEMI et MATIS. Le Service de la Recherche dépend de la Direction Technique de l'IGN qui assure la maîtrise d'ouvrage de la recherche.

L'orientation de la recherche et son évaluation sont soumises à un Comité Scientifique et Technique (CST), placé auprès Conseil d'Administration.

Effectifs

Les effectifs que l'IGN affecte à sa mission de recherche sont stables. Leur répartition et leur évolution dans les différents laboratoires sont résumées par le tableau A.1

Les colonnes 4 et 5 du tableau A.1 décomptent les étudiants menant un doctorat à l'IGN. Ces thésards sont, soit des ingénieurs fonctionnaires, soit, en contrat de recherche (CdR). La vingtaine de stagiaires de troisième cycle, accueillis par les laboratoires chaque année, ne sont pas décomptés dans le tableau.

tableau A.1 : effectifs

		chercheurs	Dont thésards	Dont CdR	support	TOTAL
MATIS	1 janvier	14	8	4	2	16
	31 déc.	15	8	4	2	17
LOEMI	1 janvier	3	0	0	2	5
	31-déc.	4	1	1	2	6
COGIT	1 janvier	17	8	4	1	18
	31 déc.	20	11	6	1	21
LAREG	1 janvier	12	3	1	1	13
	31 déc.	11	1	1	1	12

Quelques résultats

L'année 1999 a vu la mise en œuvre du prototype de caméra numérique mis au point à l'IGN, dans une mission de grande envergure : entre mai et septembre, 12 000 km² de l'Île de France ont été couverts avec un pixel d'un mètre. Cette mission marque le début d'une production issue d'un effort de recherche d'une dizaine d'années.

Un autre transfert concerne le projet AGENT du programme européen ESPRIT. Ce projet, qui traite de l'utilisation de la technique informatique du "multi-agent" pour la cartographie, a fait l'objet d'une collaboration étroite avec l'éditeur de logiciels britannique Laser-Scan.

Concernant les résultats scientifiques, il faut retenir, entre autres, la publication d'une thèse sur un modèle pour gérer les données géographiques tridimensionnelles. Ce modèle constitue la première étape pour définir des bases de données tridimensionnelles et développer des analyses complexes concernant le milieu urbain (pollution, bruit, etc.)

Sur les actions en cours, il faut noter des progrès importants dans deux domaines :

- Le traitement des images aériennes et terrestres à haute résolution (> 30 cm) en milieu urbain : restitution des bâtiments, création de scènes réalistes, mise en cohérence avec le cadastre, etc.;
- La détection des changements entre une prise de vue récente et des données ou des images plus anciennes. Cette recherche vise tout particulièrement à faciliter la mise à jour des bases de données.

Publications

Des chercheurs de l'IGN sont parmi les auteurs d'environ vingt-cinq articles, qui ont été publiés dans différentes revues scientifiques. En outre, ils sont aussi parmi les auteurs d'environ quarante communications présentées dans des congrès ou ateliers. On trouvera les références de ces articles, ainsi que celles des thèses de doctorat et des rapports dans la partie D, à la fin de ce bulletin.

Contrats de recherche

Le projet européen AGENT s'est poursuivi. Ce projet (ESPRIT 24 939) traite de la généralisation cartographique par des systèmes multi-agents.

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

Enfin, l'IGN a contribué, comme partenaire du GIE MEGRIN, au projet PETIT sur une couverture cartographique européenne au 1 : 250 000.

Manifestations

Plusieurs ateliers ont été organisés par l'IGN.

En particulier :

- du 7 au 9 avril, s'est tenu à l'IGN un congrès dans le cadre du groupe de travail II/6 de l'ISPRS,
- un atelier sur l'automatisation de la production en photogrammétrie numérique a été organisé à l'ENSG, du 22 au 24 juin. Cette manifestation était placée sous l'égide de l'OEEPE.

En outre, une journée annuelle de présentation des résultats de recherche de l'IGN a été organisée le 23 mars.

Doctorats

Le tableau A2 donne la liste des thèses de doctorat soutenues en 1999.

tableau A.2 : doctorats soutenus en 1999

	Date de soutenance	Titre de la thèse
Anne Ruas	9 avril	Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie
Patrick Sillard	12 mai	Modélisation des systèmes de référence terrestre
François Dupont	17 novembre	Extraction de l'altimétrie à partir de cartes scannées en couleur
Gil Goncalves	17 novembre	Qualité des modèles numériques de terrain

Chercheurs invités

Grâce au soutien financier de la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, l'IGN a accueilli :

- Kottappuran Mohiuddin du centre de recherche IBM à Almaden (USA), du 19 au 25 juin.
- Yvan Bedard, professeur au Centre de Recherche en Géomatique de l'Université Laval à Québec, du 22 au 26 février.

B.1 Création de cartes d'évaluation d'un modèle numérique de surface (MNS)

Olivier de Joinville

Introduction

L'utilisation des modèles numériques de surface (MNS) devenant de plus en plus fréquente, il apparaît important de pouvoir en faire une évaluation qualitative et quantitative.

Pour évaluer les MNS il est préférable d'adopter une approche chronologique en trois phases :

- avant la corrélation, il est déjà possible de repérer approximativement les zones sur lesquelles il risque d'y avoir des problèmes. Il existe, en effet, des paramètres qui peuvent influencer *a priori* sur la qualité des appariements. Ils dépendent essentiellement du paysage reconstruit (complexité et densité du bâti), de la qualité intrinsèque du corrélateur, de la technique d'acquisition de l'image (caméra numérique ou image scannée) ainsi que des conditions de prise de vues. Il est intéressant également dans cette phase, de pouvoir quantifier et localiser les parties cachées sur un couple stéréoscopique, une technique de détection des parties et vues et cachées sera expliquée dans cet article,
- pendant la corrélation, on peut aborder une phase d'auto-évaluation par l'intermédiaire d'indicateurs de traçabilité de la technique de corrélation employée (carte des coefficients de corrélation ou forme de la courbe de corrélation au voisinage du point par exemple) et d'indicateurs de cohérence géométrique locale,
- après la corrélation, une phase de validation locale permettra à l'opérateur de quantifier son évaluation à l'aide d'une comparaison avec une référence.

Cette dernière phase va être détaillée dans cet article qui décrit une méthode d'évaluation locale d'une carte de disparités issue d'une corrélation. Une carte de disparités est une image dans laquelle le compte numérique de chaque pixel représente une parallaxe avec son homologue. Certains travaux [CORD 98] et [PAPARODITIS 98] ont déjà abordé le problème de la qualité des MNS par rapport à un modèle 3-D existant.

Ici la procédure proposée ne met pas en jeu une source de vérification externe comme la base de données TRAPU (TRAcé des Perspectives Urbaines) ou un autre modèle 3-D de référence. L'opérateur va construire lui même sa référence sur des objets sélectionnés dans l'ensemble de l'image et en déduire, par comparaison locale avec la carte de disparités obtenue, des éléments d'une carte de confiance de son MNS.

La méthode se veut explicative et interactive. Il ne s'agit pas uniquement de constater que la corrélation a échoué à un endroit spécifique, mais il faut pouvoir également expliquer cet échec en ayant accès aux paramètres influant *a priori* sur la qualité de la corrélation.

Après avoir rappelé le besoin des utilisateurs de cartographie urbaine 3-D et synthétisé les résultats expérimentaux définissant l'influence des paramètres sur la qualité des cartes de disparités, nous expliquerons la méthode prévue en l'illustrant par un exemple sur un couple stéréoscopique à grande résolution (pixel au sol de huit centimètres).

Besoin des utilisateurs

Les besoins des utilisateurs sont assez difficiles à circonscrire, cependant une étude préalable [HENO 99] et une enquête de l'auteur ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes.

Les urbanistes

Devant planifier l'aménagement de quartiers, ils ont besoin de se référer à une restitution d'ensemble des bâtiments. Lors d'une visite de la communauté urbaine de Bordeaux (CUB), nous avons constaté que les urbanistes utilisaient des données d'échelles variables allant du cadastre à des extraits de la base de données cartographiques en passant par leurs propres sources issues de photos aériennes scannées à moyenne résolution.

Les ingénieurs des télécommunications

Pour optimiser les équipements en téléphonie mobile, les ingénieurs en télécommunications doivent densifier les réseaux en augmentant le nombre de stations de base et en réduisant la taille des cellules. Une cellule représente la zone couverte par une station de base, les plus petites cellules sont d'une dimension inférieure à cent mètres.

Les besoins en précision des opérateurs en télécommunications sont toutefois assez peu exigeants, le mètre semble leur convenir.

Les applications militaires

Les MNS ne sont pas encore utilisés dans le domaine de la Défense.

Des données vecteur 3-D (modèle filaire) obtenues de manière semi automatique sont employées pour les applications suivantes :

- guidage terminal de missiles,
- simulations à la navigation pour des aéronefs ou des véhicules terrestres avec cartes d'intervisibilité,
- simulations de situations de combat urbain,
- Pour l'ensemble de ces applications l'exhaustivité semble primer sur la précision géométrique.

Les responsables de l'environnement

Pour mesurer les risques liés à l'écoulement des eaux, aux avalanches, aux glissements de terrain ou à la propagation de la pollution de l'air ou de l'eau, ils seront plus intéressés par le MNT (sol) que par les bâtiments.

Les sociologues

Pour l'étude de l'évolution du cadre de vie, ils attacheront plus d'importance à l'interaction entre les bâtiments et les espaces verts. Tout comme les urbanistes, ils s'intéressent à l'évolution du peuplement et du bâti et n'ont pas besoin d'une très grande précision de restitution.

Les architectes

Le laboratoire de l'école d'architecture de Nantes (CERMA) étudie les facteurs d'environnement pour améliorer les outils de l'architecte. Il s'agit pour les chercheurs de cet établissement de modéliser l'éclairage, l'ensoleillement, les flux acoustiques et les écoulements aérodynamiques tels que le vent ou certains phénomènes convectifs sur les bâtiments. Ils utilisent des données TRAPU sur leurs zones d'étude.

L'industrie cinématographique et le tourisme

Pour faire des images de synthèse de présentation d'une ville ou pour des projets de réalité virtuelle, d'animation ou de simulation, les collectivités locales ainsi que les professionnels de la communication devront récupérer des données 3-D permettant à l'utilisateur de se repérer dans un endroit précis de la ville. L'effet visuel sera donc prédominant sur la précision géométrique.

En résumé, dans la plupart des cas, aucuns des utilisateurs de données 3-D en zone urbaine mentionnés ci-dessus ne réclame de précision submétrique.

Influence de différents paramètres sur la qualité des cartes de disparités

Une étude expérimentale a permis de déterminer l'impact qualitatif (sur la corrélation et sur la précision des cartes de disparités qui en résultent) de certains facteurs dépendant de la technique de corrélation adoptée, des caractéristiques des objets étudiés et de l'image ainsi que des conditions de la prise de vues.

Les tableaux ci-dessous résument les estimations obtenues. Ces dernières seront affinées et validées par d'autres observations sur des campagnes de prises de vues de l'IGN.

Paramètres liés à la corrélation	
<i>Taille de la vignette</i>	Petites fenêtres : corrélation bruitée, assez bonne localisation sur les bords. Grandes fenêtres : inverse.
<i>Types de corrélation</i>	La densité et la qualité des appariements dépendent de la richesse d'informations collectées localement. Les fusions de corrélation ou les multi-corrélations fourniront, par conséquent, de bons résultats. Les techniques de relaxation [ROUX et al 98] et d'approximation des surfaces par des plans, à partir d'une segmentation [FRADKIN et al 99] sont également satisfaisantes. La programmation dynamique [BAILLARD 97] restitue bien la localisation des bords et est précise en altimétrie.

Paramètres liés à la nature des bâtiments	
<i>Pente des toits, complexité de la géométrie des bâtiments et densité du bâti</i>	Influence prédominante due à la dissemblance des formes d'une image à l'autre.
<i>Texture des toits des bâtiments</i>	Les zones homogènes ou à motifs répétitifs sont souvent bruitées.

Paramètres liés à la radiométrie et à la géométrie des images	
<i>Le pas d'échantillonnage au sol</i>	Le sous-échantillonnage d'une image n'altère pas l'exactitude des cartes de disparités, d'où l'intérêt des corrélations multi-résolutions.
<i>B/H des couples</i>	Un fort B/H améliore localement l'exactitude de l'altimétrie, mais augmente les zones d'occlusion, les fautes d'appariement seront par conséquent plus nombreuses.
<i>Les ombres et l'éclairage solaire</i>	Les zones homogènes claires semblent moins bruitées que les zones sombres.

Description de la méthode

Les zones étudiées sont des bâtiments à toits plats ou à une, deux ou quatre pentes, ainsi que des zones au sol plates ou en pente. Des bâtiments en forme de L (quatre ou six pentes), de U (six ou huit pentes) ou de carré (huit pentes) peuvent également être intégrés.

Préambule : détection des parties vues et cachées

Un algorithme de localisation et d'évaluation de l'altitude des parties cachées a été développé, il fonctionne selon le principe suivant.

Pour chaque pixel des deux images, affectation d'une altitude obtenue par projection sur un MNS. Ce MNS est soit issu d'une source externe, soit issu d'une corrélation à partir du couple étudié :

- localisation des parties cachées dans l'image droite et visible sur l'image gauche :
 - descente le long du rayon perspectif et récupération du point terrain correspondant,

- projection de ce point dans l'image de droite et récupération de son altitude,
- comparaison des altitudes obtenues dans les deux images suivantes : si la différence dépasse un certain seuil (fixé le plus souvent à la précision estimée en altimétrie du MNS), alors on a détecté une partie cachée,
- évaluation en altimétrie de la partie cachée le long du rayon perspectif (doubles flèches en pointillé sur la figure B.1.1).

- de manière analogue, localisation des parties cachées dans l'image de gauche et visible sur l'image droite,
- pour chaque image, détermination du pourcentage de parties cachées par rapport au nombre total de pixel

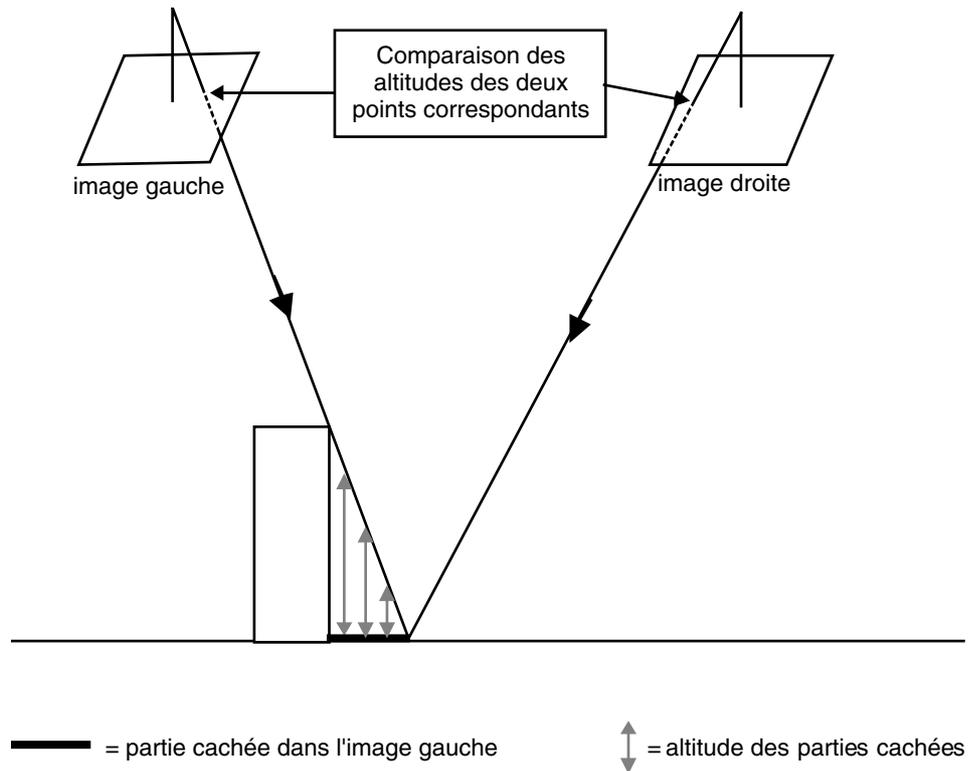


figure B.1.1 : mise en évidence d'une partie cachée du bâtiment

Description des différentes phases

Phase préparatoire

- Sélection des zones d'intérêt, l'opérateur saisit les points de contour de ces zones et en mesure les disparités maximales et minimales.
- Corrélation sur un couple et obtention d'une carte de disparités.
- Création d'une carte de disparités de référence sur laquelle n'apparaissent que les objets sélectionnés.
- Sur la carte de disparités, création d'un masque de toutes les parties situées en dehors des zones sélectionnées.

Phase de calculs

- Création d'une carte de localisation des erreurs dans laquelle sont positionnés à l'intérieur des objets, les écarts de disparités avec la référence en valeurs algébriques. Cette image permettra de détecter des objets du toit (cheminées, mansardes,...) que la référence lissée n'aura pas pris en compte.
- Création de cartes d'évaluation à partir de l'histogramme des écarts de disparités pour chaque objet évalué suivant les critères suivants :
 - pourcentage de pixels non appariés : exhaustivité de détection des appariements,
 - moyenne algébrique : biais sur l'ensemble de l'histogramme,

- écart type : dispersion sur l'ensemble de l'histogramme,
- moyenne absolue : moyenne des valeurs absolues des écarts sur l'ensemble de l'histogramme,
- médiane des écarts sur l'ensemble de l'histogramme à comparer avec la moyenne algébrique pour avoir une idée du nombre de points qui ont posé des problèmes d'appariement.

NB : la moyenne algébrique, l'écart type, la moyenne absolue et la médiane seront exprimés sous forme de hauteur en centimètres. Le passage des disparités en hauteur a été approximé en multipliant par la résolution au sol et en divisant par le B/H.

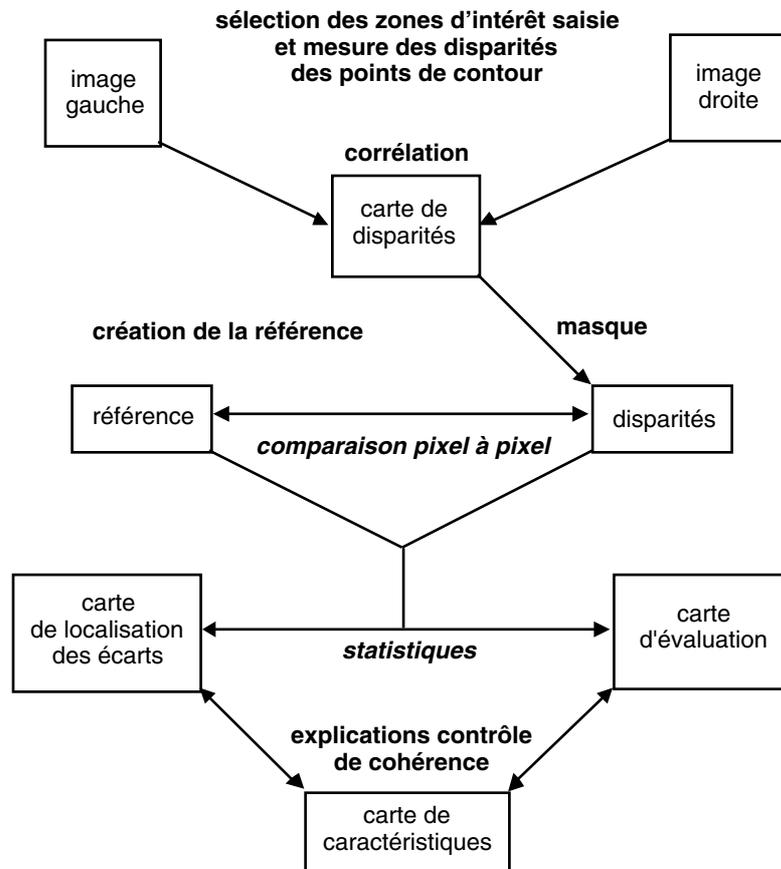
Phase d'explication des résultats et de vérification de cohérence

Création d'une carte des caractéristiques de chaque objet évalué suivant les trois critères chiffrés suivants :

- moyenne des contrastes sur les points de contour : cet indicateur permet de se faire une idée de la qualité des pointés qui ont permis d'élaborer la référence. La valeur de contraste est obtenue en calculant l'écart type d'une fenêtre de quinze pixels sur quinze centrée sur chaque point de saisie,
- écart type des radiométries des pixels afin de quantifier l'homogénéité de la texture. Ce paramètre a été affiné en prenant la médiane des écarts type des radiométries des pixels sur une fenêtre de quinze pixels sur quinze (taille de la fenêtre de corrélation sur la dernière passe) qui se déplace dans toute l'image,
- pourcentage de pixels non appariés

Cette dernière carte va permettre d'expliquer les raisons d'un échec dans la corrélation. Afin de mieux comprendre ses résultats, l'opérateur peut également ajouter manuellement un certain nombre d'attributs comme la rugosité de la surface, l'inclinaison des pentes, l'éclairement ou la présence d'ombres.

Schéma récapitulatif



Résultats obtenus

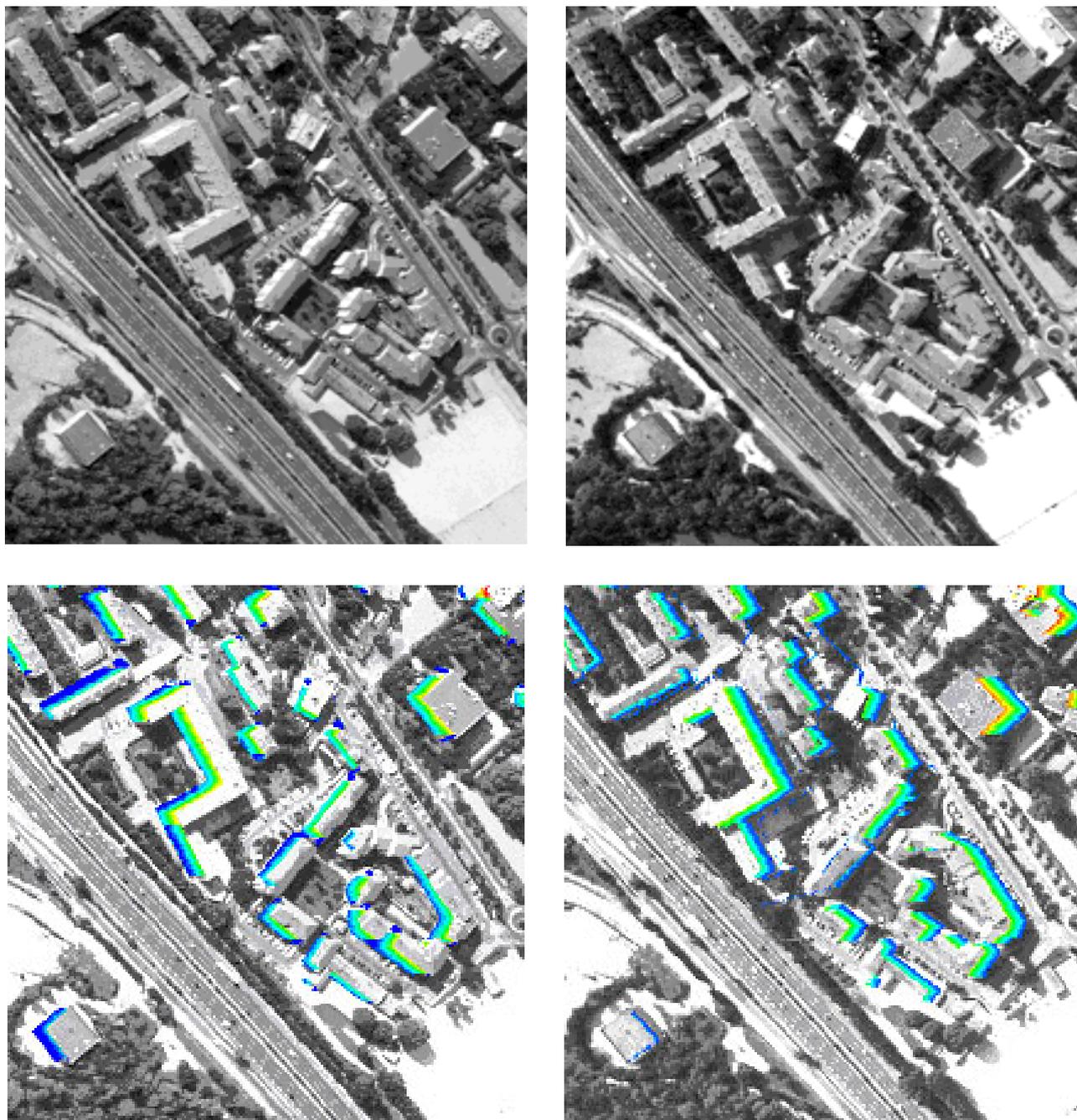


figure B.1.2

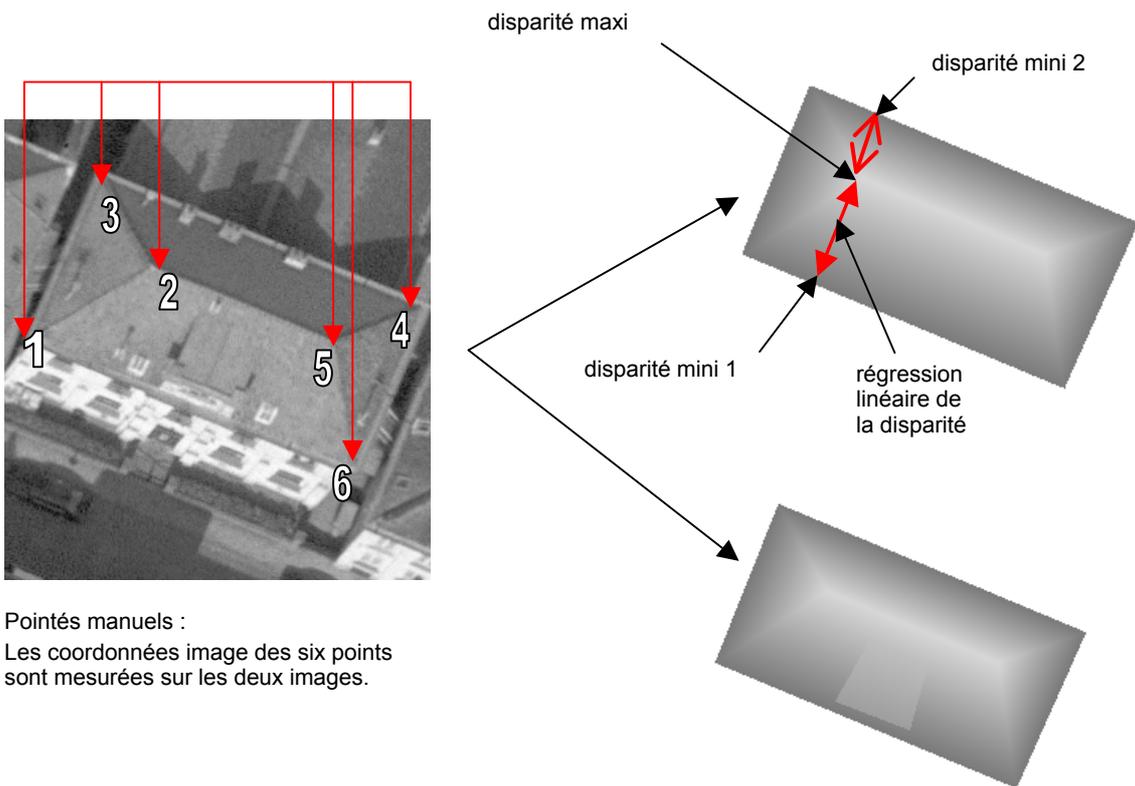
Le dégradé en couleurs matérialise la hauteur des parties cachées (doubles flèches en pointillé sur la figure B.1.1). Ici, nous avons 11% de pixels cachés dans les deux images.

Saisie des points de contour et création de la carte de disparités de référence

Nous l'avons vu, les besoins des utilisateurs sont assez peu stricts en matière de précision. Les petites aspérités vont donc pouvoir être lissées sur les cartes de disparités de référence.

La confiance accordée à ces dernières va cependant être liée à la précision des pointés, aussi il est très souhaitable que cette opération soit effectuée par plusieurs personnes et que les résultats soient pondérés.

La saisie peut se faire en bimonoscopie mais il est préférable qu'elle se fasse directement en stéréoscopie. En bimonoscopie, la mesure des disparités peut également être assistée par un calcul de corrélation sur la ligne épipolaire correspondante.



Pointés manuels :
Les coordonnées image des six points sont mesurées sur les deux images.

Carte de disparités de référence.
L'opérateur, en fonction de son besoin en précision, prendra ou non en compte la mansarde.



La saisie se fait parfois à l'intérieur des contours, pour éviter de prendre en compte des parties d'autres bâtiments qui se projettent sur le toit étudié (ici une cheminée).

figure B.1.3

Explication du processus de saisie des points de contour, de mesure de leur disparité et de création de la carte de disparités de référence.

Application sur un couple d'images à haute résolution

Le couple traité est d'une résolution au sol de huit centimètres et se situe sur une zone en urbain dense. La taille des images est de 1024 x 1024 pixels.

Couple étudié

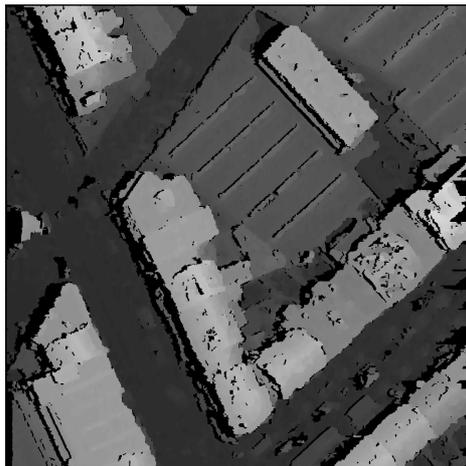


image gauche



image droite

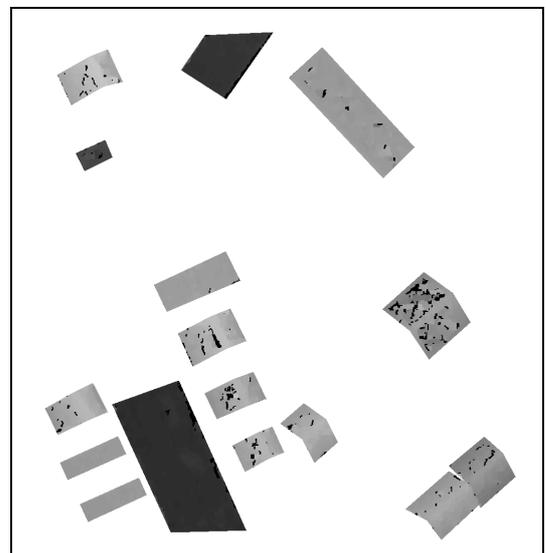
Carte de disparités obtenue



carte de disparités de référence

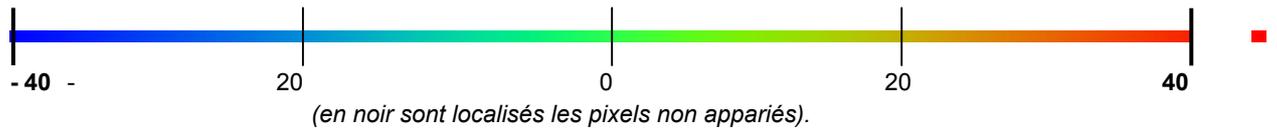
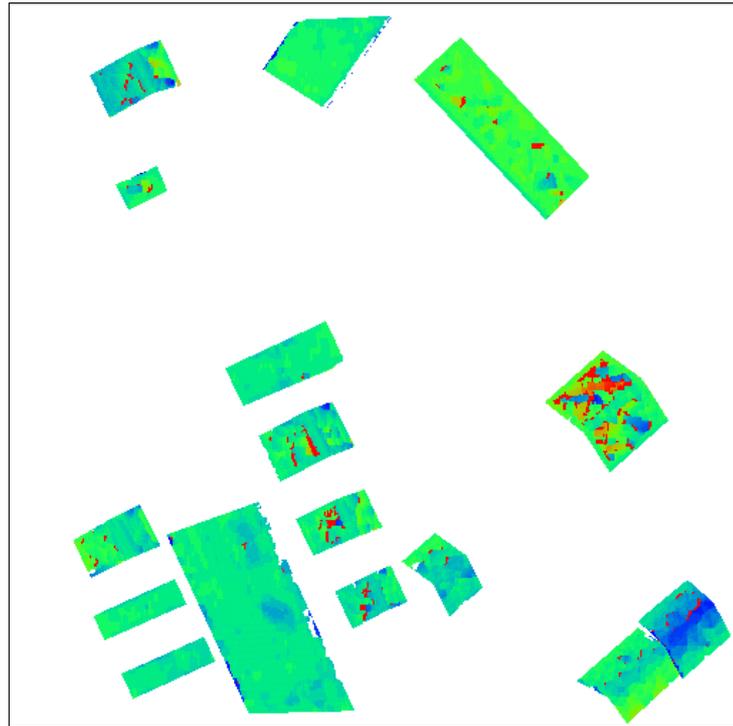


carte de disparités masquée

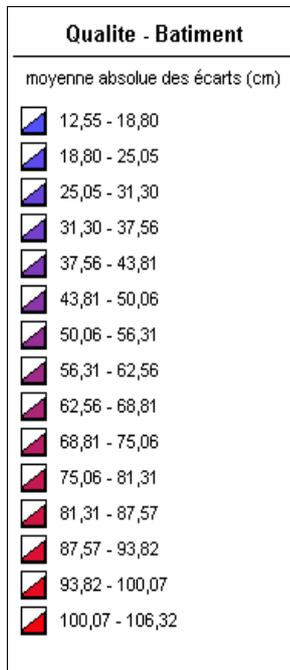


Comparaison
pixel à pixel

Carte de localisation des écarts de disparités (en pixels)



Cartes d'évaluation (ici carte de moyenne absolue)



Résultats

Paramètres influant sur les résultats

Valeurs statistiques mesurant la qualité

	Contraste sur les points de saisie	écart-type radiométrie	Pourcentage de points non appariés	moyenne algébrique (cm)	écart-type (cm)	moyenne absolue (cm)	médiane (cm)
Bâtiment 1	42,60	20,81	2,72	3,99	46,59	36,91	0
Bâtiment 2	42,03	23,88	0	4,08	20,35	12,55	0
Bâtiment 3	34,09	11,37	0	-15,03	25,64	16,76	0
Bâtiment 4	31,46	16,84	3,66	-30,57	71,24	58,52	-37
Bâtiment 5	30,15	9,21	3,42	9,90	56,77	34,21	29
Bâtiment 6	39,37	27,33	0,42	1,72	58,72	14,51	0
Bâtiment 7	22,99	12,08	5,42	-10,25	52,93	35,55	-7
Bâtiment 8	31,30	13,83	6,78	3,28	46,88	32,38	0
Bâtiment 9	33,97	13,01	5,44	-26,12	48,76	35,61	-18
Bâtiment 10	28,31	14,48	2,55	-22,90	63,37	42,40	-29
Bâtiment 11	30,07	6,40	11,50	51,36	116,2	84,25	37
Bâtiment 12	25,95	7,20	1,02	56,57	68,34	59,09	59
Bâtiment 13	21,81	14,06	1,72	10,90	57,17	42,83	18
Bâtiment 14	20,35	16,04	2,49	-103,47	130,9	106,32	-96
Zone 1	13,35	13,88	2,43	-13,54	38,17	17,79	0
Zone 2	20,42	9,56	5,26	15,49	47,94	28,79	29

(en gras, les valeurs maximales et minimales)

Les valeurs statistiques mesurant la qualité ne prennent en compte que les points appariés.

Interprétation des résultats

Compte tenu de la résolution au sol de l'image (huit centimètres), on voit globalement que les résultats sont assez dispersés (la colonne écart type contient des valeurs élevées). Ceci peut s'expliquer notamment par le faible B/H (0,27).

Les bâtiments plats obtiennent dans l'ensemble de meilleurs résultats que les bâtiments en pente, ils ne subissent en effet quasiment pas de déformations d'une image à l'autre. Les bâtiments clairs et les bâtiments foncés ont des résultats très mélangés ne permettant pas d'édicter des règles rigoureuses quant à l'influence de leur couleur sur la qualité des corrélations.

Bien que les bâtiments à deux pentes (1, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13 et 14) soient de formes assez semblables, leurs résultats sont disparates, car leurs caractéristiques (éclairage, texture, rugosité,...) diffèrent de manière conséquente. L'orientation de ces bâtiments ne semble pas jouer un rôle prédominant : en effet le bâtiment 7 qui subit une dissemblance de forme plus importante que le bâtiment 11 a des résultats moins dispersés et plus exacts.

Le bâtiment 2, plat, assez texturé et bien lisse a donné de très bons résultats. En revanche, on peut constater que le bâtiment 14 est mal corrélé (exactitude mauvaise et forte dispersion). Il contient en effet beaucoup de pics secondaires (16) dans son histogramme d'écart du fait de la présence de petites cheminées et de zones alternativement claires et sombres. De plus la dissemblance de formes de ce bâtiment d'une image à l'autre est très importante. Pour ce même bâtiment, la carte de localisation des écarts montre une répartition des erreurs les plus importantes juste de part et d'autre de la ligne de faite.

Toutefois les points de saisie du contour du toit étant peu contrastés, il se peut que les disparités de la référence soit légèrement erronées. Le bâtiment 11, de par l'homogénéité de sa texture, possède le pourcentage le plus élevé de points non appariés. On constate cependant qu'il n'y a pas de cohérence parfaite entre le pourcentage des points non appariés et l'écart type de la radiométrie des surfaces étudiées ce qui démontre bien que d'autres facteurs que l'homogénéité des surfaces sont à l'origine de problèmes d'appariement (voir figure B.1.4, page suivante).

Dans la figure B.1.4, montrant l'influence de l'homogénéité de la surface sur la précision des cartes de disparités, on constate que les deux courbes subissent de nombreux changements de pentes alors qu'elles devraient être théoriquement toujours décroissantes. Il serait donc intéressant de définir plus finement l'homogénéité des surfaces au sens du corrélateur en l'associant à une mesure d'auto-corrélation permettant de détecter d'éventuelles structures dans la texture. Typiquement le bâtiment 12 qui est le deuxième bâtiment le plus homogène obtient de bien meilleurs résultats que le 11 car son signal est beaucoup plus structuré.

Les écarts entre la médiane et la moyenne algébrique sont souvent importants ce qui confirme la présence de nombreux points mal appariés (outliers). Les histogrammes, bien que non gaussiens la plupart du temps, sont assez bien centrés puisque six objets ont leur médiane à 0.

Le contraste sur les points de saisie influe peu sur la qualité des résultats, les pointés sur des détails peu apparents ont été suffisamment précis.

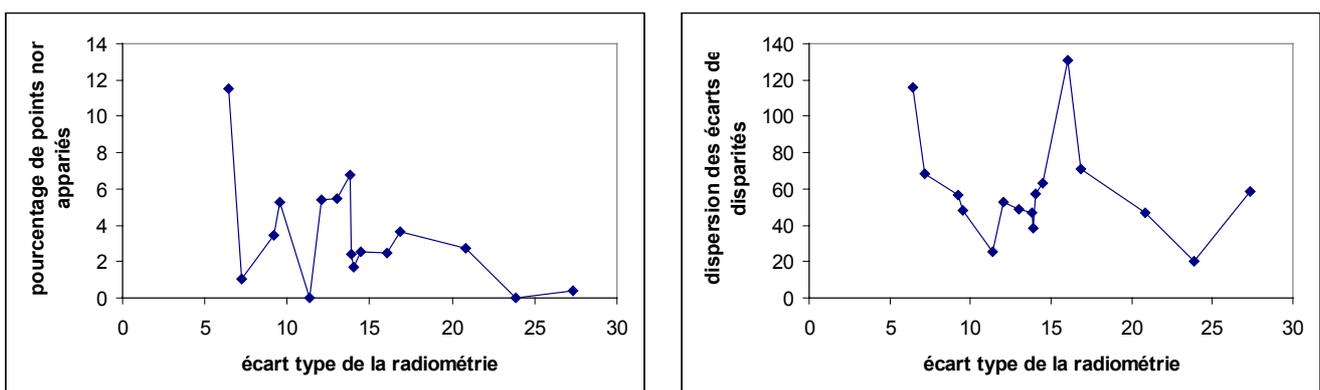


figure B.1.4

Mise en évidence de l'influence de l'homogénéité de la surface sur la qualité de la corrélation.

La visualisation des histogrammes des bâtiments 1, 4 et 7 (figure B.1.5) nous donne des indications quant à l'interprétation de leur courbe. Les bâtiments 4 et 7, très semblables, ont des histogrammes d'allure assez similaire avec un pic principal bien marqué et peu de pics secondaires. En revanche, l'histogramme du bâtiment 1 fait apparaître un pic secondaire très proche du pic principal et presque aussi important que lui.

L'interprétation de ces histogrammes repose sur les deux critères principaux suivants :

- forme du pic principal : plus il sera élevé et étroit, plus le nombre de points bien corrélés augmentera,
- la taille et le nombre de pics secondaires : lorsqu'ils sont de taille importante, ils illustrent les défauts de modélisation provenant du lissage de la référence (non prise en compte d'objets volumineux sur le toit), lorsqu'ils sont plus petits et plus nombreux, ils traduisent la non prise en compte d'objets de petite taille par la référence mais également le bruit résultant des problèmes d'appariement.

Afin d'être interprétés avec le plus de pertinence, les histogrammes doivent être examinés simultanément avec la carte de localisation des erreurs et l'image brute.

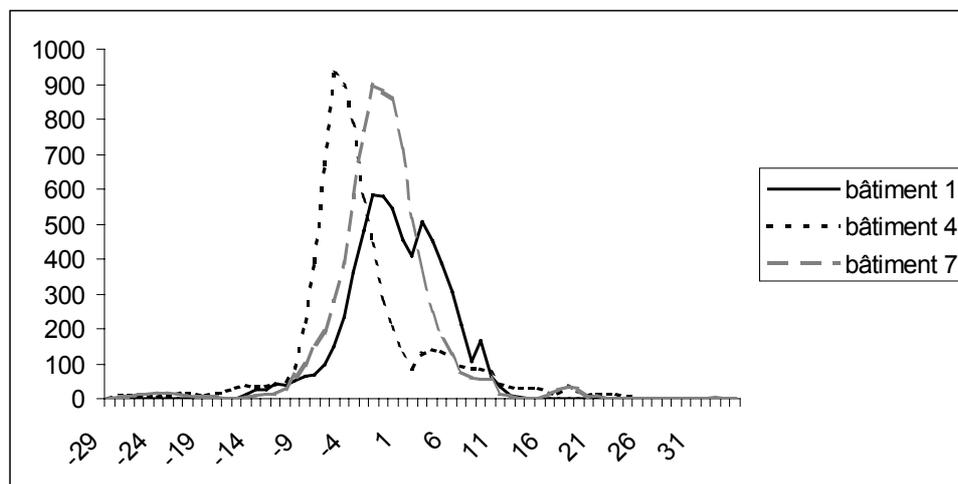


figure B.1.5

Histogramme des erreurs de trois bâtiments à deux pentes.

Conclusion - perspectives

Nous avons décrit une évaluation locale des MNS en altimétrie qui pourrait être utilisée dans le cadre d'un processus de contrôle qualité de cartes de disparités.

La saisie doit se faire avec le plus grand soin. Cette phase indispensable pour obtenir une référence la plus fiable possible a pris environ une heure pour le couple étudié dans le paragraphe précédent. En revanche, le temps de calcul est très rapide, moins d'une minute pour les seize objets. De plus, cette évaluation s'appliquant à des cartes de disparités, ne nécessite pas de mise en place ou d'orientation absolue des images, d'où un gain de temps supplémentaire. La saisie de points homologues déjà faite permet de calculer automatiquement une orientation relative.

La référence étant lissée, le choix des bâtiments se limite à ceux dont les toits ne contiennent pas trop de petits objets qui pourraient biaiser les résultats. Les objets volumineux, tels que mansardes ou chiens-assis peuvent être pris en compte en fonction des besoins en précision de l'utilisateur. Les bâtiments aux formes trop complexes devront également être évités, afin de ne pas trop compliquer la construction de la référence. Les modèles de cette dernière vont néanmoins s'enrichir au fur et à mesure.

Les résultats, de par leur divergence, montrent bien que l'on peut difficilement qualifier globalement un MNS. La corrélation réagit en effet très différemment localement : une future étude de cohérence géométrique de chaque pixel avec son voisinage en fonction de la surface étudiée va permettre de mieux contrôler ces irrégularités.

Cette méthode va être testée sur un chantier de la ville d'Amiens, comprenant des bâtiments variés en forme et en hauteur et qui nous permettra donc de développer des règles plus robustes en termes d'analyse des résultats. Ce chantier comprenant une référence 3-D externe (TRAPU), nous pourrons ainsi faire une évaluation qualitative prenant en compte des écarts dans les trois dimensions.

Références

[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, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, laboratoire MATIS, IGN-SR 970005/C-THE, octobre 1997.

[CORD 98] M. Cord : *A Analyse d'images aériennes haute résolution : détection et modélisation du bâti en zone urbaine*, thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, décembre 1998.

[FRADKIN et al 99] M. Fradkin, M. Roux & H. Maitre : *Urban areas description using multiple aerial images*, SFPT, Special issue on workshop 3D Geospatial data production: meeting application requirement, vol. 153, pp. 36-53, Paris, avril 1999.

[GUINET 98] B. Guisnet : *La propagation pour les services de mobilité*, in L'écho des recherches (CENT-ENST) n° 170, pp. 15-24, 1^{er} trimestre 1998.

[HENO 99] R. Heno : *Étude préalable à l'industrialisation de la production des MNE*, rapport interne, IGN, décembre 1999.

[PAPARODITIS 98] N. Paparoditis : *Reconstruction tridimensionnelle de paysages urbains en imagerie stéréoscopique satellitale haute résolution*, thèse de doctorat de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, laboratoire MATIS, IGN-SR 980042/C-THE, janvier 1998.

[ROUX et al 98] M. Roux, U. Leloglu & H. Maître : *Dense urban DEM with three or more high-resolution aerial images*, IRS, Symposium on GIS between vision and application, pp. 347-352, Stuttgart (D), septembre 1998.

B.2 Vers l'orthophotographie avec bâtiments redressés

Didier Boldo

Introduction

Une orthophotographie (ou ortho-image) est une image superposable à une carte. C'est donc un cliché déformé de telle manière que le centre de prise de vue soit à la verticale de chaque point. C'est une perspective cylindrique, ou encore axonométrique. Classiquement, les défauts qui sont corrigés sont dus à la non verticalité de l'axe de prise de vue, à la rotondité de la terre et au relief du sol. Les objets situés en sursol (bâtiments, ponts, forêts...) ne sont alors pas parfaitement corrigés. Le défaut principal qui subsiste est le dévers, c'est-à-dire que les bâtiments apparaissent " couchés " sur les images (figure B.2.1). Ils masquent alors une partie du sol, et leurs surfaces et leurs positions sont fausses (voir figures B.2.9 et B.2.10).



figure B.2.1 : exemple de dévers

Contexte

Même si elles restent chères actuellement, des descriptions 3-D de grandes agglomérations devraient être disponibles d'ici quelques années. Que ce soit par des méthodes de calcul par corrélation automatique d'images [BAILLARD 97] [CORD 98] et [CORD et al 98], ou par des lasers aéroportés (même si cette technique semble encore un peu jeune [HUISING, GOMES PEREIRA 98]), des projets de production industrielle ont commencé à voir le jour.

Dans le même temps, sont apparues des images aériennes numériques à haute résolution, en couleurs ou en niveaux de gris, et de très bonne qualité radiométrique. Grâce à elles, les problèmes de cohérence de couleurs liés au développement des clichés et au scannage (problèmes très difficiles à modéliser et à corriger) ne se posent pratiquement plus. Seuls restent les problèmes liés à la physique de la prise de vue tels que le vignettage, le hot-spot ... (voir [LE MEN, BOLDO 00], pour une description détaillée). À partir de ces deux types de données, il semble donc naturel de calculer des ortho-images complètement redressées, y compris des dévers des immeubles.

Travaux antérieurs

Le plupart des travaux sur les orthophotographies se limitent au redressement des objets se trouvant au sol [DÜREN 93] [KNABENSCHUH 95] [NORVELLE 96] [SIGLE et al 96] [THORPE, SCHICKLER 96]. Cela signifie donc que tous les objets en sursol (immeubles, ponts...) sont déformés, et que leur surface et leur position ne sont pas exactes. De plus, une partie des données du sol est masquée. Dans des villes très encaissées, certaines rues disparaissent ainsi complètement des ortho-images.

L'utilisation directe des algorithmes classiques avec une description 3-D des objets au lieu du modèle de terrain n'est pas possible. En effet, dans le cas classique les clichés sont déformés de manière continue, et aucun " trou " ne peut donc être laissé. Or, dans notre cas, il manque de l'information (fond de rues, bas de bâtiment...), qui est masquée par les dévers des bâtiments. Les algorithmes classiques comblent ces trous par des données erronées : soit le bord de toit, soit des morceaux de façade.

Pour l'éviter, il est nécessaire de gérer explicitement ces occultations. Lorsqu'une corrélation a été effectuée sur les clichés, il existe une carte de disparité, qui fait apparaître les occultations. Celle-ci peut donc être utilisée pour localiser les parties cachées et donc calculer les ortho-photographies exactes. Dans notre cas, cependant, la corrélation a été effectuée sur d'autres clichés que ceux utilisés pour calculer les ortho-images.

Cette technique ne peut donc pas être utilisée. De plus, il paraît intéressant d'être capable d'utiliser différents types de description de la surface visible, tels que ceux issus de restitution, ou de laser aéroportés. Le problème de la fusion des ortho-images n'a été abordé qu'avec des données continues. Il s'agit alors simplement de déterminer des lignes de raccord entre ortho-images. Dans notre cas, la présence d'occultation complique sensiblement le problème.

Données

L'algorithme peut utiliser tout type de description de la surface des objets (laser, corrélation, restitution...) si celle-ci peut être transformée en un ensemble de triangles. Jusqu'à présent, les tests ont été effectués à partir de Modèles Numériques de Surface (MNS) issus de corrélation [BAILLARD 97] et voir l'extrait (figure B.2.2, ci-dessous).

Pour notre application, les qualités nécessaires de la description de la surface sont :

- bonne précision sur hauteur des bâtiments,
- non-continuité de la surface (façades verticales),
- précision de localisation des bords de bâtiment.

Les MNS utilisés répondent aux deux premiers critères. En revanche, les frontières des bâtiments sont assez nettement bruitées et délocalisées. De même, du fait du bruit de corrélation, les surfaces planes (toits et surtout sol) sont assez irrégulières.

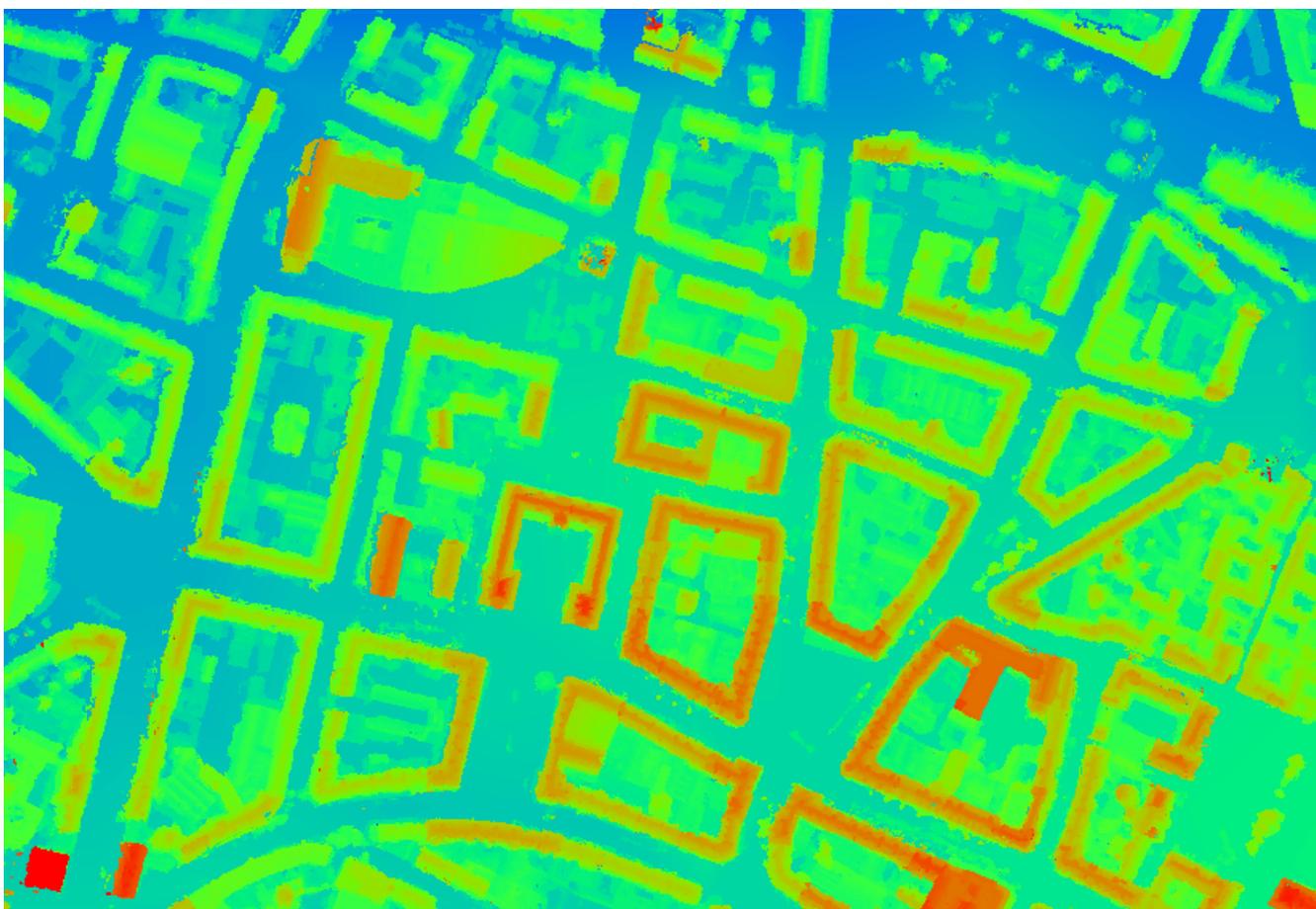


figure B.2.2 : MNS de corrélation (ville d'Amiens)

Les images utilisées pour le calcul sont issues des caméras numériques développées à l'IGN/LOEMI [SOUCHON, THOM 97]. Les capteurs numériques permettent de s'affranchir de nombreux problèmes de cohérence radiométrique entre images, dus au développement des clichés et au scannage [THOM, JURVILLIER 97]. Les images utilisées sont issues, soit du capteur couleur 3072 x 2048 pixels, soit du capteur panchromatique 4096 x 4096 pixels.

Si les conditions de prise de vues n'ont pas trop variées, et s'il est vu sous un angle peu important, un même objet aura donc une radiométrie voisine dans les différentes images. Dans les prises de vues classiques (figure B.2.3), les clichés sont pris par bandes successives, l'ouverture de champ (angle apparent sous lequel est vu un point (figure B.2.4) le long d'une bande est relativement réduite, et les temps entre chaque deux prises de vues consécutives sont très courts (quelques secondes). Les images d'une même bande sont alors très cohérentes radiométriquement, beaucoup plus qu'entre bandes.

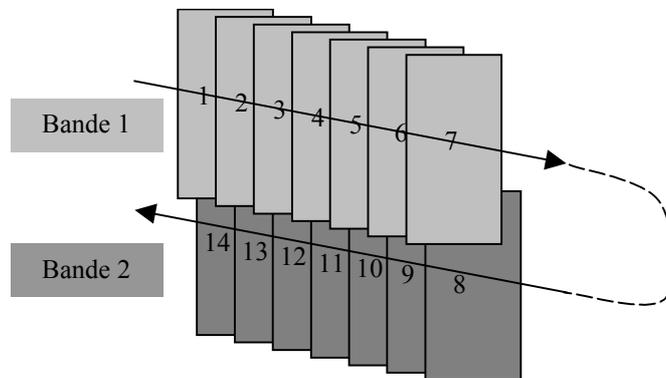


figure B.2.3 : schéma des prises de vues

À l'opposé, les conditions d'éclairage, météo, etc. évoluant au cours du temps, les bandes peuvent être moins cohérentes entre elles. De plus, l'ouverture de champ entre bandes est beaucoup plus importante, introduisant des biais supplémentaires (figure B.2.4). La cohérence radiométrique n'est donc plus assurée.

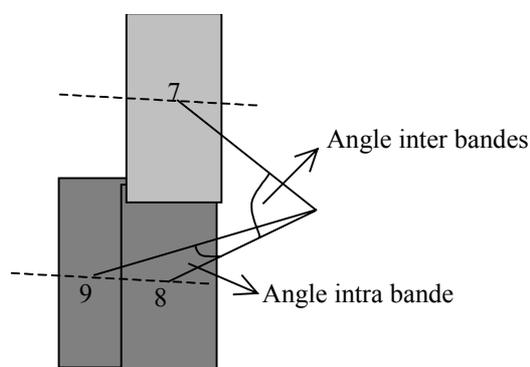


figure B.2.4 : ouverture de champ

Calcul de l'ortho-image

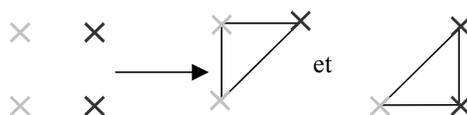
À partir des données décrites ci-dessus, le principal problème pour le calcul de l'ortho-image est la gestion des occultations, c'est-à-dire des zones qui ne sont pas dans la photo (fond de rues...). Celles-ci doivent être laissées vierges sur l'orthophotographie.

Présentation de l'algorithme

L'idée de l'algorithme est de projeter le MNS dans la géométrie de la prise de vue et d'attribuer à chaque point de l'image à redresser, l'altitude du point vu. Cette altitude est stockée dans ce que nous appellerons l'altitude-buffer (par analogie avec le z-buffer). Ensuite, lors du calcul de l'ortho-image, il suffit de vérifier que les points projetés ne sont pas occultés par des points d'altitude plus élevée.

Calcul de l'altitude-buffer

La première étape consiste à faire passer le MNS d'un mode maillé à un ensemble de triangles :



Les triangles ont été préférés aux quadrangles car ils sont plus rapides à calculer et posent moins de problèmes numériques lors de l'interpolation. Ensuite, chaque triangle est projeté dans la géométrie de prise de vue.



L'altitude-buffer est alors rempli par interpolation entre les altitudes des trois sommets du triangle projeté. Quand un point est recouvert par plusieurs triangles, l'altitude la plus élevée est conservée. En effet, les prises de vue étant toujours quasi verticale, ce sont toujours les points les plus hauts qui masquent les points bas. Une fois remplie, l'altitude-buffer est une image des altitudes des points du cliché.

Sur la figure B.2.5, on constate bien la présence des façades des immeubles, alors que celles-ci sont implicites dans le MNS. On note également l'imprécision et l'irrégularité des bords des immeubles.

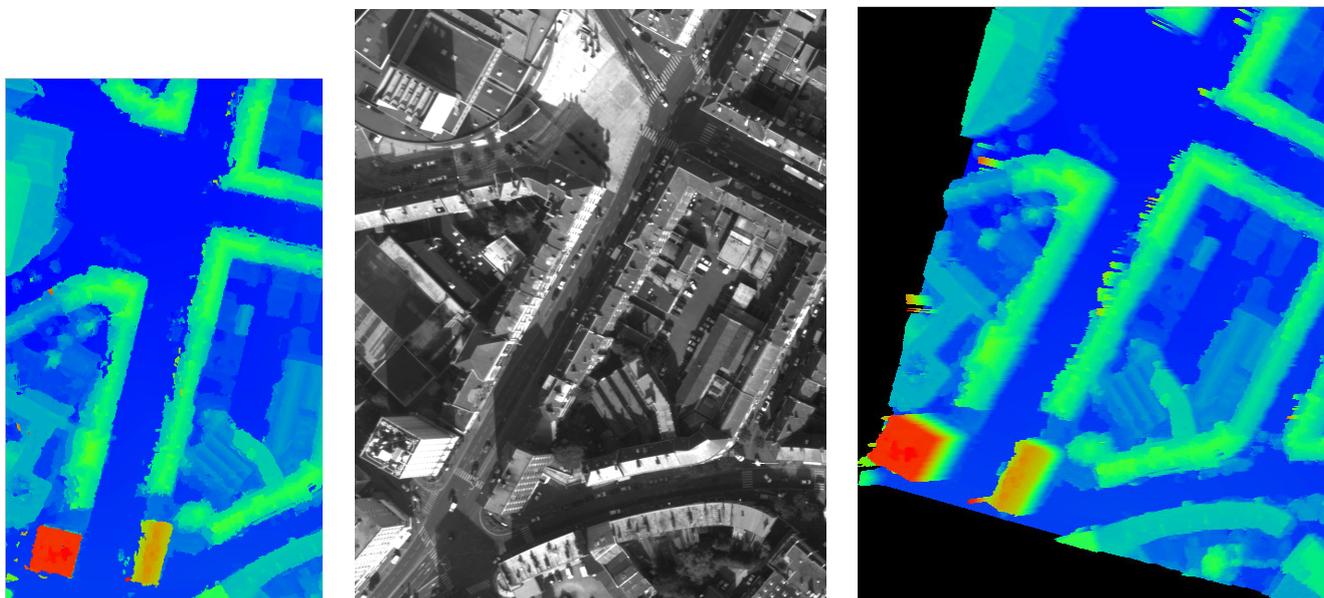


figure B.2.5 : MNS, image et son altitude buffer

Calcul de l'image

À partir de ces données, le calcul de l'ortho-image est très simple. Chaque pixel de l'ortho-image possède des coordonnées cartographiques. À partir du MNS, on détermine l'altitude de ce pixel, ce qui donne un point en 3-D. Ensuite, ce point est projeté dans la géométrie de prise de vues.

On vérifie que l'altitude présente dans l'altitude-buffer correspond bien à l'altitude déterminée dans le MNS. Si ce n'est pas le cas, cela signifie qu'un point d'altitude plus élevée (un toit...) a recouvert ce point, et donc que ce point n'est pas visible sur cette image. Sinon, le point est visible, et la valeur du pixel est déterminée par interpolation.

Le problème est alors de choisir les pixels sur lesquels effectuer l'interpolation. En effet, les pixels voisins dans le cliché ne le sont plus obligatoirement dans l'ortho-image. Les conditions de Shannon (peigne de Dirac en 2-D) pour le ré-échantillonnage ne sont plus respectées. Il est alors nécessaire de vérifier quels pixels du voisinage peuvent être utilisés et appliquer un ré-échantillonnage ne tenant compte que de ces pixels, comme cela se fait en bord d'image.

Résultats

Les images numériques utilisées se situent sur l'agglomération d'Amiens, et ont une résolution d'environ vingt centimètres. La prise de vues a eu lieu le 13 octobre 1999, donc assez tard dans l'année, vers 10 h 30, heure solaire, ce qui explique la taille importante des ombres.

Le MNS a été calculé à partir de ces images numériques. Il est au pas planimétrique de vingt centimètres, pour une précision altimétrique estimée de l'ordre de trente centimètres. Le temps de calcul des ortho-images est très raisonnable : deux minutes pour le calcul complet (altitude-buffer + image) d'une ortho-image de 11,5 Mo sur un PC Pentium II 333 MHz.

La figure B.2.6 montre les résultats bruts de l'algorithme de calcul d'ortho-images, appliqué à trois images successives d'une même bande. Le redressement des bâtiments est nettement visible, ainsi que les zones noires dues aux occultations. Ainsi, l'immeuble, en bas à gauche des images, induit une occultation à droite dans l'ortho-image de gauche, peu d'occultation sur l'ortho-image centrale, et une occultation à gauche sur l'ortho-image de droite (calculée à partir de l'image de la figure B.2.5).

On constate la présence de nombreuses petites taches noires, notamment sur les toits. Ces défauts sont dus à l'irrégularité du MNS, issu de corrélation. En effet, les zones planes sont remplies de petites aspérités dues au bruit de corrélation, qui peuvent créer de fausses occultations. Ce problème peut être facilement résolu en comblant ces petits trous en fonction des radiométries de leur frontière, si celle-ci est à peu près constante. Le résultat est visuellement satisfaisant, car ces occultations sont de taille très faible.

Un problème, plus difficile à résoudre, est celui posé par la légère délocalisation de la limite du bâtiment dans le MNS. Sur les ortho-images, les bords de toits sont très irréguliers, ce qui crée cette impression désagréable. Pour résoudre ces problèmes, il serait nécessaire de modifier localement le MNS. Des travaux sont en cours pour régulariser et repositionner les bords de bâtiments, mais le problème général est très complexe.



figure B.2.6 : ortho-images brutes calculées à partir de trois images d'une même bande

Fusion

Les images ainsi calculées présentent des “ trous ” dûs aux occultations et possèdent de très grandes plages de recouvrement. Il est donc possible de combler ces trous en fusionnant les données calculées à partir de chaque cliché. Dans le même temps, les clichés se recouvrant de manière assez importante, il faut également choisir, pour chaque (x,y) sur quelle ortho-image prendre le pixel. Diverses stratégies peuvent être proposées.

Fusion simple

La manière la plus simple de fusionner est de choisir une ortho-image et de remplir ses occultations avec des pixels venant de toutes les images en recouvrement.

Cette technique donne des résultats relativement satisfaisants lorsque les données proviennent d'une même bande, car l'intervalle de temps qui sépare deux clichés est très réduit (figure B.2.7, voir plus bas). Par contre, la fusion de données provenant de bandes différentes pose des problèmes de cohérence radiométriques assez importantes (figure B.2.8, page suivante), dues à la plus grande ouverture de champ (voir figure B.2.4) et aux différences de conditions d'éclairément. Cette méthode, présente aussi l'inconvénient du choix des images maîtresses. Elle introduit une asymétrie dans un problème où toutes les images jouent potentiellement le même rôle.

Fusion par bandes

À partir des résultats de la fusion simple, une autre technique a été développée. Compte tenu de la manière dont sont prises les images (figure B.2.3), la fusion est effectuée en plusieurs temps, en privilégiant les recouvrements au sein d'une bande.

Tout d'abord, les clichés d'une même bande sont mosaïqués de manière automatique [LE MEN, BOLDO 00], afin de minimiser la visibilité du raccord, en privilégiant le cliché dont l'axe de prise de vues est le plus vertical, car c'est celui où les problèmes d'occultations sont minimaux. Le but est de réduire au maximum le nombre de zones d'occultations à combler.

Par une simple croissance de région, chaque zone d'occultations de la bande mosaïquée est isolée et sera traitée séparément. Pour chaque zone d'occultation, on recherche, si, dans la bande, il n'existe pas une ortho-image telle que la zone soit totalement présente, sans aucune occultation. Si plusieurs ortho-images contiennent la zone, on la comble avec les données provenant de l'image dont l'axe de prise de vues est le plus vertical. Les zones qui ne peuvent être comblées par les données d'un seul cliché ne sont pas modifiées.

En pratique, on constate (figure B.2.7) que le comblement en intra-bande ne pose pas de problème radiométrique, mais cela reste à valider dans d'autres conditions de prise de vues. Ensuite, les bandes elles-mêmes sont mosaïquées de la même manière que précédemment. Les occultations qui peuvent être comblées intégralement à partir d'une autre bande, le sont.

En pratique, (figure B.2.8, page suivante), des problèmes de cohérence radiométrique commencent à apparaître. Il est donc nécessaire de mettre en place des modèles afin de corriger les effets de vignettage, d'atténuation atmosphérique et surtout de modification des conditions d'éclairément, afin de modifier chaque zone pour la remettre en cohérence avec son environnement. Ce travail est en cours, et le remplissage est, pour l'instant, effectué sans traitement particulier.



figure B.2.7 : fusion simple des trois ortho-imagettes de la figure B.2.6

Les zones restantes, c'est-à-dire celles qui n'ont pu être remplies à partir d'un seul cliché, sont alors comblées partiellement par des pixels d'un cliché, celui d'axe de prise de vues le plus vertical de la même bande, ou à défaut, d'une autre bande, moyennant un traitement radiométrique.

La zone d'occultation, qui est maintenant de taille inférieure, est considérée comme une nouvelle zone d'occultation et l'algorithme tente de la combler complètement en intra-bande, ou à défaut, en inter-bande, ou d'en combler une partie et de recommencer.

Résultats

La figure B.2.7 montre le résultat du remplissage des occultations de l'ortho-image centrale de la figure B.2.6 par les données des deux autres images, ainsi que le remplissage de zones de petite taille par la valeur médiane de la frontière.

L'image obtenue contient, certes, les défauts des deux précédentes, notamment, au niveau des bords de toits, mais est proche de l'orthophotographie idéale, où tous les points seraient vus à la verticale. Le sol est bien visible des deux côtés des bâtiments, et les toits sont remis en géométrie. On constate, par ailleurs, l'excellente cohérence radiométrique des images (aucun traitement d'égalisation n'a été appliqué). Cela rend possible le remplissage des occultations et facilite nettement le calcul de la mosaïque.

La figure B.2.8 montre un résultat du même type, sur des images couleurs, dans le cas où l'occultation ne peut être résolue que par des données venant d'une autre bande (l'image a été éclaircie pour amplifier le problème). Les couleurs des ombres ne sont pas du tout cohérentes : l'occultation est comblée avec une ombre beaucoup plus sombre que celle de l'image environnante. Ces modifications sont dues aux variations des conditions d'éclairage entre les deux bandes.

Le travail de retraitement des radiométries afin de prendre en compte les variations d'éclairage est en cours. Il devrait permettre, à terme, de fusionner les données issues de tous les clichés en recouvrement. Pour l'instant aucun traitement particulier n'est effectué, d'où ce type de résultat.

Les figures B.2.10 et B.2.11, donnent des exemples de traitement complet sur des zones relativement importantes et proposent la comparaison avec une ortho-image classique (figure B.2.9).

L'image complète dont est issue la figure B.2.10 fait 1500 x 1500 (soit 6,43 Mo), avec un pixel sol de quarante centimètres (soit 600 m x 600 m). Elle a nécessité le calcul de onze ortho-images sur deux bandes et leur fusion. Le calcul total a duré dix minutes sur un PC Pentium II 333 MHz.



figure B.2.8 : problème radiométrique en fusion inter-bandes

Conclusion et perspectives

L'apparition d'images aériennes de bonne qualité radiométrique, associée à la disponibilité de Modèles Numériques de Surface de plus en plus précis, devraient permettre de calculer des ortho-images complètement redressées.

La méthode présentée dans cet article permet de résoudre les problèmes géométriques liés à la gestion des occultations. La fusion des données issues des différentes ortho-images peut s'effectuer de diverses manières. La stratégie retenue de fusion par bandes semble convenir aux conditions de prise de vues habituelles en photographie aérienne.

Les images obtenues peuvent couvrir des zones arbitrairement grandes et sont parfaitement remises en géométrie. Elles permettent de situer tous les objets urbains, de réaliser des vues de bonne qualité perspectives (figure B.2.12), et utilisables notamment pour la visualisation de projets d'aménagement ... De nombreux travaux sont en cours, et leurs résultats devraient permettre d'améliorer considérablement l'aspect visuel de l'ortho-image fusionnée.

Au niveau du MNS, des algorithmes de régularisation sont en test, afin d'améliorer la qualité des façades. En ce qui concerne la gestion des occultations, une méthode de fusion par zone sera prochainement développée, et devrait permettre de s'affranchir de tous les problèmes de pixels colorés aux bords des zones d'occultation. Enfin, une modélisation physique des radiométries est en cours de développement.

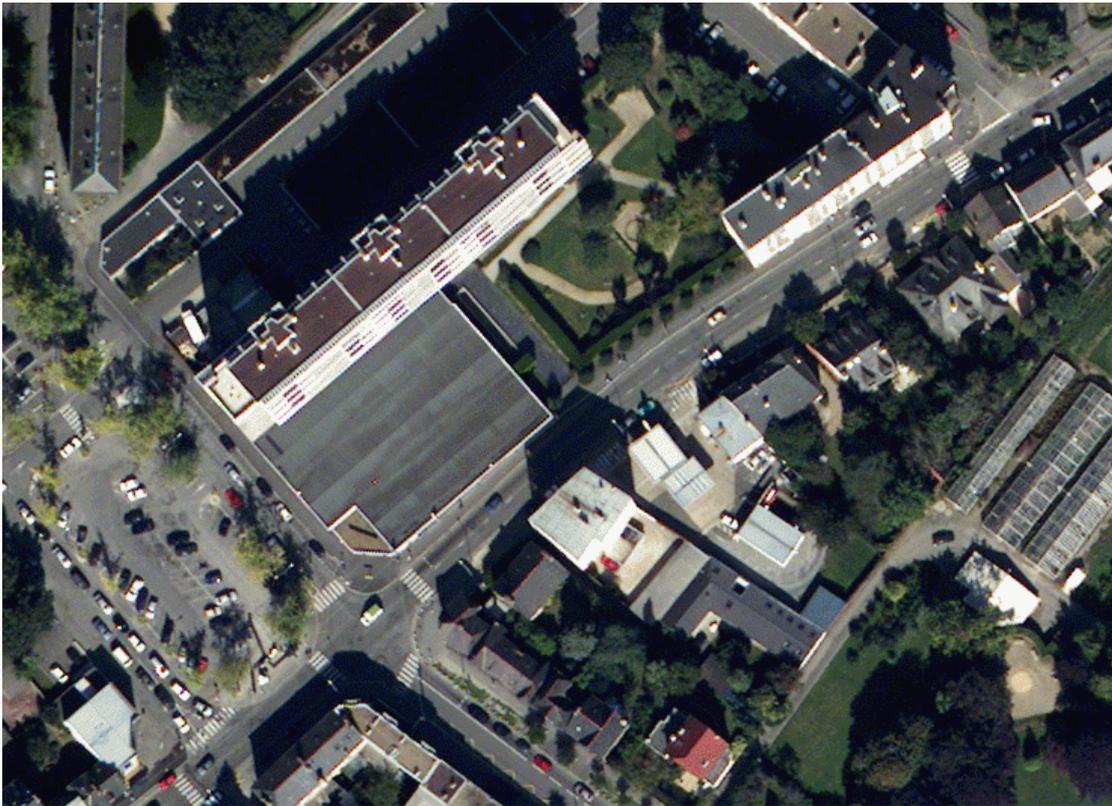


figure B.2.9 : ortho-image classique

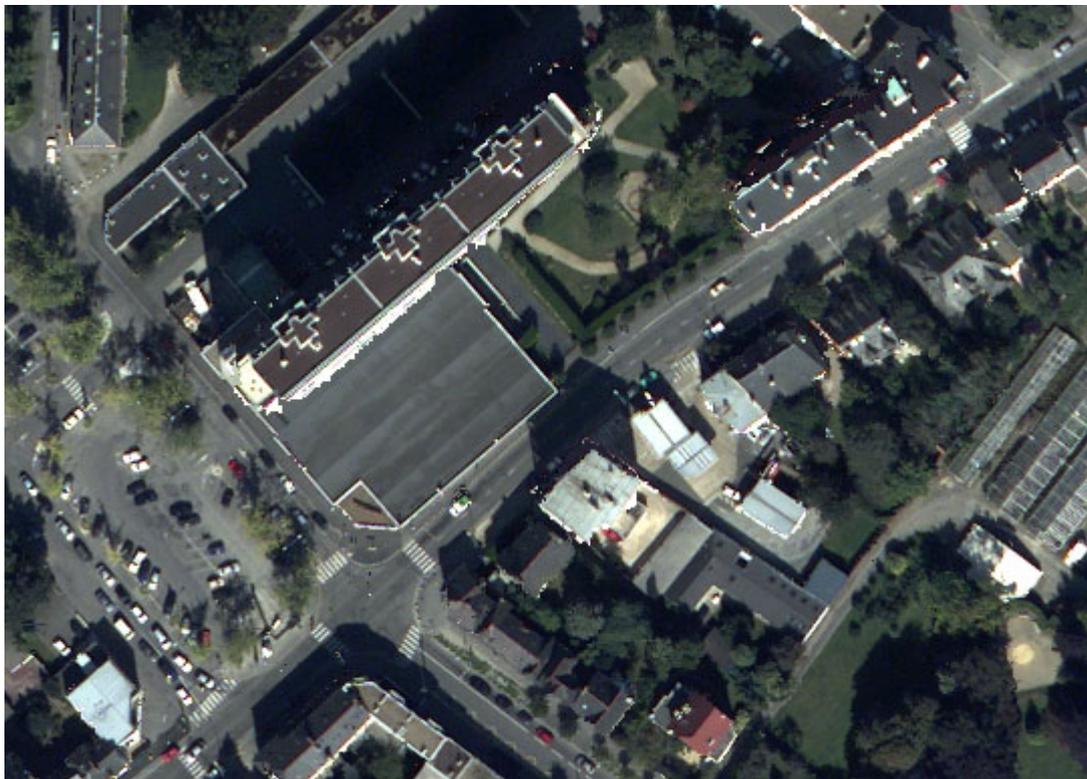


figure B.2.10 : ortho-image redressée et fusionnée

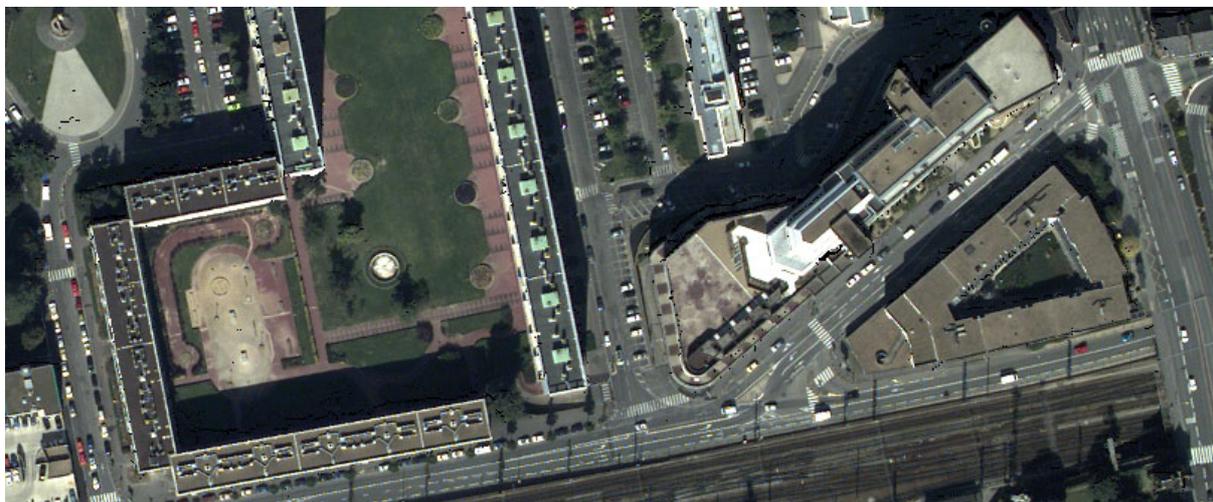


figure B.2.11 : ortho-image redressée et fusionnée

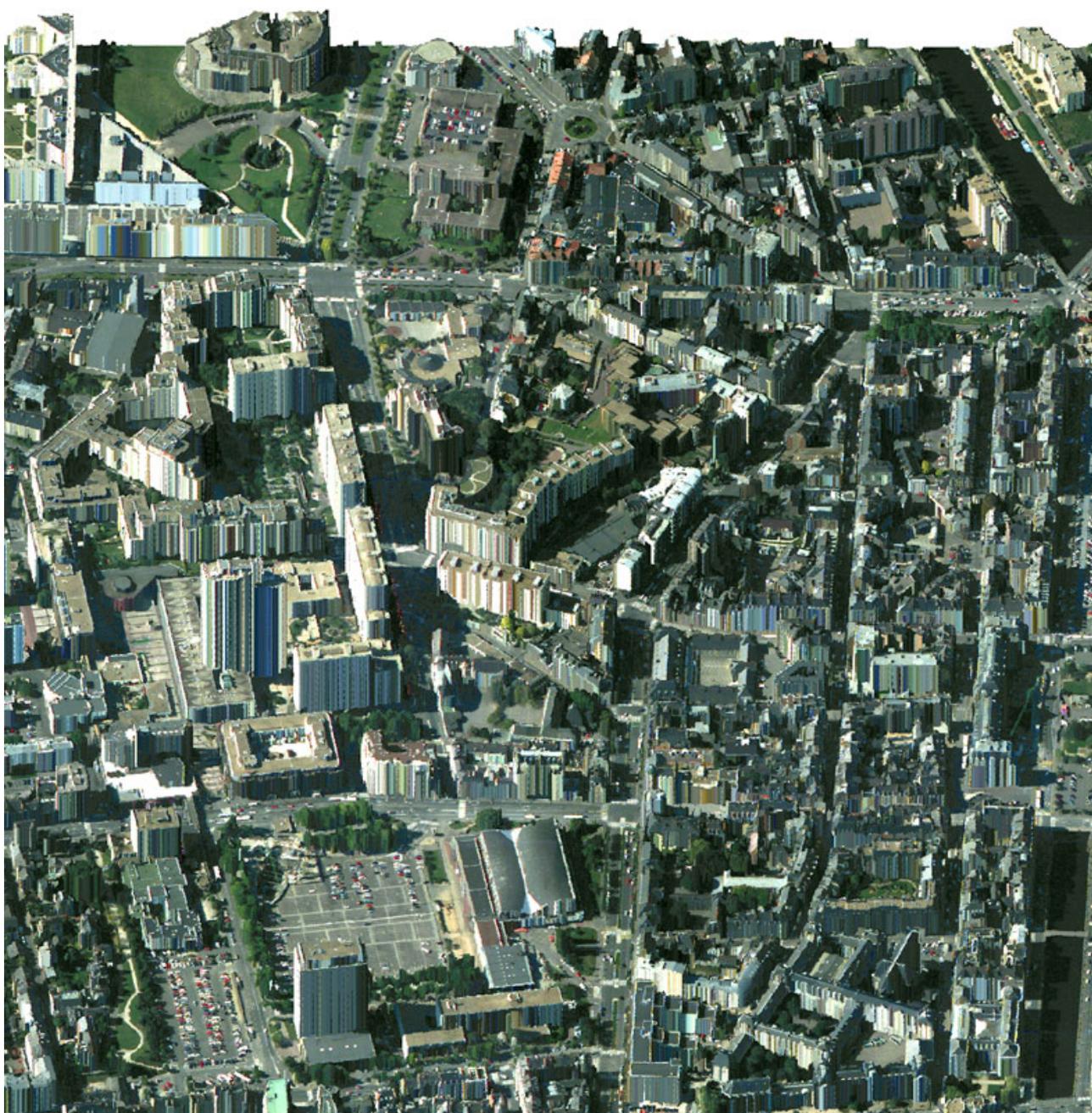


figure B.2.12 : perspective réalisée à partir du MNS et d'une ortho-image

Références

- [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, École Nationale Supérieure des Télécommunications, laboratoire MATIS, IGN-SR 970005/CTHE-CB, soutenue le 10 octobre 1997.
- [CORD 98] M. Cord : *Analyse d'images aériennes haute résolution : détection et modélisation du bâti en zone urbaine*, thèse de doctorat de l'Université de Cergy Pontoise, décembre 1998.
- [CORD et al 98] M. Cord, N. Paparoditis & M. Jordan : *Dense, Reliable, and Depth Discontinuity Preserving DEM Computation from H.R.V. urban stereopairs*, ISPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Cambridge (UK), vol. 32, n° 2, Commission II, pp. 49-56, laboratoire MATIS, IGN-SR 980040/C-COM, juillet 1998.
- [DÜREN 93] U. Düren : *Digital Orthophoto Generation*, in 1st Course on Digital Photogrammetry of Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn and Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn 1993.
- [HUISING, GOMES PEREIRA 98] E.J. Huising and L.M. Gomes Pereira : *Errors and Accuracy Estimates of LaserData Acquired by Various Laser Scanning Systems for topographic Applications*, in ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 53, n° 5, October, 1998.
- [KNABENSCHUH 95] M. Knabenschuh : *Generation and Use of Digital Orthophotos*, 2nd Course on Digital Photogrammetry of Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn and Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn, 1995.
- [NORVELLE 96] F.R. Norvelle : *Using Iterative Orthophoto Refinements to generate and correct digital elevation models (DEM)*, Digital Photogrammetry : An addendum to the Manual of Photogrammetry, C. Greve, ed., ASPRS 1996.
- [SIGLE et al 96] M. Sigle, O. Hellwich and A. Kîstli : *Intersection and combination of digital elevation models - Methods and Applications*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 31 Part B4, Vienna (A), 1996.
- [SOUCHON, THOM 97] J.-P. Souchon & Ch. Thom : *Apport de nouvelles technologies dans l'acquisition de données topographiques : les caméras numériques de l'IGN*, in Revue XYZ, n° 78, pp. 24-30, laboratoire OEMI, IGN-SR 970001/L-ART-JPS, 1997.
- [THOM, JURVILLIER 97] Ch. Thom & I. Jurvillier : *An aerial digital frame camera for photogrammetry : radiometric comparison with scanned imagery*, in Geomatica, vol. 51, n° 2, pp. 133-141, laboratoire OEMI, IGN-SR 970008/L-ART-CT, 1997.
- [THORPE, SCHICKLER 96] J.A. Thorpe and W. Schickler : *New automated procedures for creating large scale digital orthophotography in urban areas*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 31 B3, Vienna (A), 1996.

B.3 Reconstruction de Modèles Numériques de Surfaces en zone urbaine à partir de prises de vues aériennes numériques à fort recouvrement

Nicolas Paparoditis, Ibtissam Baghli et Christian Thom

Introduction

Le laboratoire MATIS mène, depuis plusieurs années, des activités de recherche sur la reconstruction automatique de Modèles Numérique de Surface par analyse de couples d'images aériennes stéréoscopiques [BAILLARD 97] [DISSARD et al 99].

Ces MNS sont utiles en tant que tels pour un grand nombre d'applications : utilisation dans des SIG, production de cartes d'inter-visibilité pour l'optimisation du placement d'antennes pour les télécommunications, cartographie des risques (inondations, glissements de terrain, avalanches, etc.), détection automatique de changements pour la mise à jour des bases de données, préparation de missions, réalité virtuelle, etc. Mais sont aussi des données essentielles pour l'élaboration d'autres produits cartographiques : orthophotos, modèles 3-D de bâtiments de type TRAPU [PAPARODITIS et al 98] [FUCHS et al 99] [JIBRINI et al 00], etc.

Pour cette dernière application qui reste un axe prioritaire de recherche du laboratoire MATIS, des images de très grande résolution (< 20 cm) sont nécessaires afin de mettre en évidence l'ensemble des structures tridimensionnelles nécessaires à l'élaboration de la description fine d'un bâtiment [CORD et al 98].

À ces résolutions, et dans un contexte de tissu urbain dense, les parties cachées (zones au pied des bâtiments) sont importantes et une description dense et complète de la scène par analyse stéréoscopique n'est alors pas possible. D'autre part, en zone urbaine, l'analyse stéréoscopique par corrélation rencontre certains problèmes de fiabilité liées aux ambiguïtés de ressemblance des deux images (zones homogènes, surfaces spéculaires, véhicules mobiles, etc.).

L'acquisition de prises de vues à multiples points de vues par un fort recouvrement latéral et longitudinal (un point du paysage est vu dans plus de deux images) permet de résoudre un certain nombre de problèmes. En effet, si le recouvrement est suffisant, il existe toujours un ou plusieurs couples parmi l'ensemble des couples sur lequel un point donné du paysage est visible et où ces problèmes de spéularité et de véhicules mobiles n'apparaissent pas.

Des techniques de gestion et d'exploitation de ce type de données ont été traitées abondamment dans la littérature récente [LELOGLU et al 98], [CANU et al 95], [GABET et al 94], [FOURNIER 99] et ont aussi été abordées au laboratoire MATIS dans le cadre d'un stage [MAYER 98].

Dans la majorité des techniques développées, le MNS est reconstruit par une fusion *a posteriori* de tous les MNS élémentaires calculés sur tous ou un sous-ensemble de couples stéréoscopiques par une technique de vote majoritaire (par exemple basé sur la médiane). Ce processus permet de densifier et fiabiliser de manière considérable les résultats quand ceux-ci sont complémentaires et le plus souvent justes sur l'ensemble des couples.

Par contre, le processus d'appariement stéréoscopique élémentaire par corrélation impose l'utilisation de taille de vignettes non négligeables si l'on souhaite des mesures suffisamment fiables. Or la taille des vignettes conditionne directement la qualité morphologique des MNS, i.e. l'aptitude à restituer les pentes, les ruptures de pentes, les microstructures du relief, toutes cruciales pour de nombreuses applications. Plus les vignettes sont grandes et plus les "hautes fréquences" du relief sont lissées, plus les discontinuités sont délocalisées, et plus l'appariement de surfaces en pentes est difficile (du fait de la déformation entre voisinages homologues).

Une solution pour réduire la taille des vignettes est d'améliorer le rapport signal à bruit des images de manière à réduire les ambiguïtés d'appariement : soit naturellement en ayant un système imageur de meilleure qualité, soit artificiellement en augmentant le nombre d'observations. L'originalité de notre travail réside dans l'utilisation d'images de la caméra numérique du Laboratoire OEMI (très bon rapport signal à bruit de 300 environ) avec un fort recouvrement latéral et longitudinal et le développement d'un processus de reconstruction extrêmement simple mais réellement adapté à la nature et à la complémentarité des données.

Le principe de notre approche : appariement multi-images guidé depuis l'espace objet

Un nouveau prototype de corrélateur adapté à ces données a donc été développé en partie dans le cadre d'un stage [BAGHLI 99]. Cet outil permet de construire des MNS, et les ortho-images associées, à partir de données multi-images de la caméra numérique de l'IGN sans passer par un traitement par couple stéréoscopique qui nécessiterait une fusion *a posteriori* de l'ensemble des MNS élémentaires et par conséquent une gestion des raccords et des recouvrements.

Ce prototype est basé sur un concept d'appariement multi-images (corrélation multi-fenêtres) guidé depuis l'espace objet (voir figure B.3.1). Ce prototype suit l'algorithmie suivante. Pour chaque nœud (x,y) de la grille du MNS, on construit un profil de corrélation regroupant tous les coefficients de corrélation calculés pour chacun des z possibles dans un intervalle plausible conditionné par une connaissance *a priori* de la zone (BDZ, BDTopo, etc.).

Pour chaque z donné, on détermine dans l'ensemble des images, les positions (i_k, j_k) hypothétiques correspondantes ($0 < k < n$ où n est le nombre d'images).

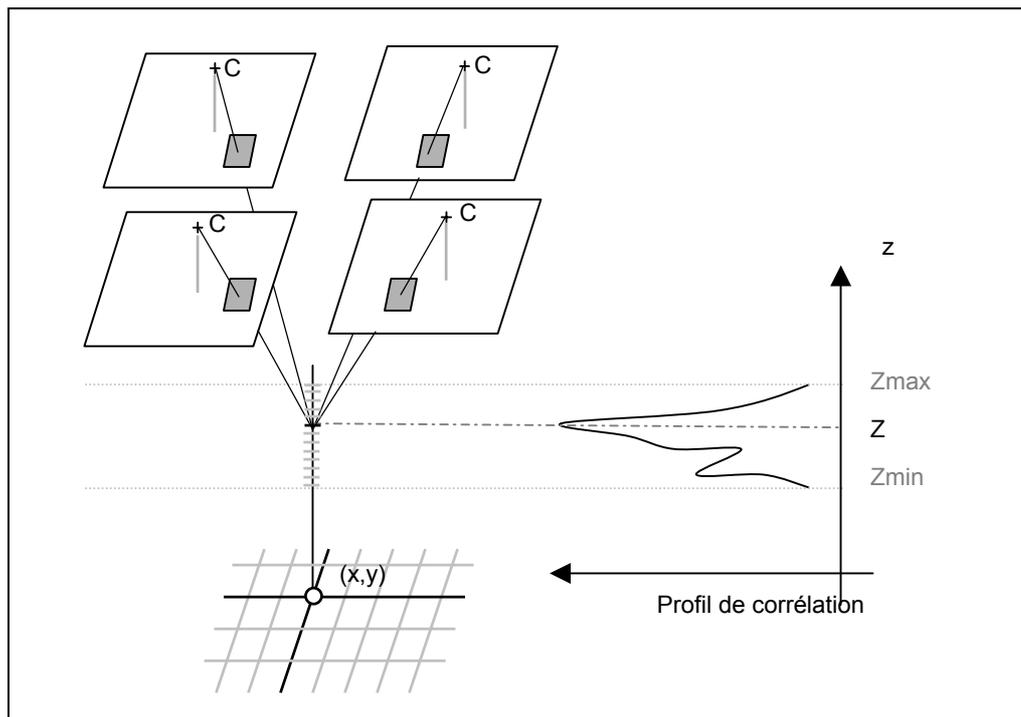


figure B.3.1 : principe de notre appariement multi-vues

La vraisemblance de cette hypothèse est donnée par une mesure directe de la ressemblance de l'ensemble des fenêtres/imagettes centrées sur les (i_k, j_k) . Le Z "estimé" que l'on retient pour un (x,y) est généralement le z pour lequel on atteint la valeur optimale du coefficient de corrélation. De plus, pour ce (x,y) et pour ce Z estimé, on peut calculer directement la radiométrie correspondante dans l'ortho-image à partir de l'ensemble des radiométries observées aux points (i_k, j_k) (en prenant par exemple la moyenne ou la médiane des valeurs).

En pratique, on ne traite pas séquentiellement l'ensemble des nœuds de la grille du MNS. En effet, les (i_k, j_k) ont en réalité des positions subpixelaires. Les imagettes à corrélérer sont donc obtenues par rééchantillonnage des images autour des (i_k, j_k) .

Afin d'éviter la redondance d'opérations de rééchantillonnage pour des points voisins dans le MNS, on rééchantillonne (projette) pour un z donné l'ensemble des images et on calcule pour tous les (x,y) et pour ce z donné, un coefficient de corrélation. Si ce z est le bon, ces images rééchantillonnées doivent être localement superposables et le coefficient de corrélation optimal. Et on recommence itérativement ce processus pour l'ensemble des z .

Un coefficient de ressemblance multi-imagettes

Comment peut-on mesurer la ressemblance d'un ensemble d'imagettes ? L'extension directe du coefficient de corrélation croisé normalisé centré à n imagettes rectangulaires n'est pas possible car celui-ci donne le produit scalaire et donc une information sur l'angle formé par les deux vecteurs de textures V , dont les composantes sont formées par l'ensemble ordonné des radiométries des différents pixels des imagettes.

Nous avons donc défini un coefficient de Corrélation Multi-Image (CMI) adapté :

$$0 \leq \text{MIC}(i_1, j_1, i_2, j_2, \dots, i_n, j_n) = \frac{\text{Var}(\sum_{k=1}^n \vec{v}_k(i_k, j_k))}{\sum_{k=1}^n \text{Var}(\vec{v}_k(i_k, j_k))} \leq n$$

Pourquoi ce coefficient de corrélation ? Si les textures des vignettes images se ressemblent, i.e. les vecteurs de textures sont colinéaires, le critère de similarité CMI est maximal. On remarquera que si $n = 2$, ce coefficient n'est autre que le coefficient de corrélation croisé normalisé centré usuel.

Pondération radiométrique

Vu la stabilité radiométrique des images de la caméra numérique (ce qui n'est pas le cas des clichés scannés) et sous l'hypothèse que la plupart des objets qui décrivent le paysage ont des caractéristiques lambertiennes, nous imposons une contrainte supplémentaire sur la radiométrie " absolue " des voisinages sous la forme d'une fonction de pondération. Cette pondération est nécessaire.

En effet, notre critère de ressemblance " CMI " est " moyenne centrée " ; celui nous donne donc la ressemblance des textures des voisinages et non pas la ressemblance de la radiométrie des voisinages ce qui peut provoquer des appariements aberrants (voir figure B.3.2).

Notre nouvelle mesure de similarité " CMIA " peut s'exprimer de la manière suivante :

$$CMIA (i_1, j_1, \dots, i_n, j_n) = CMI (i_1, j_1, \dots, i_n, j_n) \cdot \exp - \left(\frac{\text{Var}_k(I_k(i_k, j_k))}{k} \right).$$

où Var est la variance, $I(i,j)$ est la radiométrie au pixel (i,j) et k un facteur de normalisation.

L'application de cette fonction de pondération permet d'obtenir un critère de similarité qui caractérise à la fois la ressemblance texturale et la ressemblance radiométrique des voisinages. Celui-ci est donc plus robuste et discriminant (voir figure B.3.2).

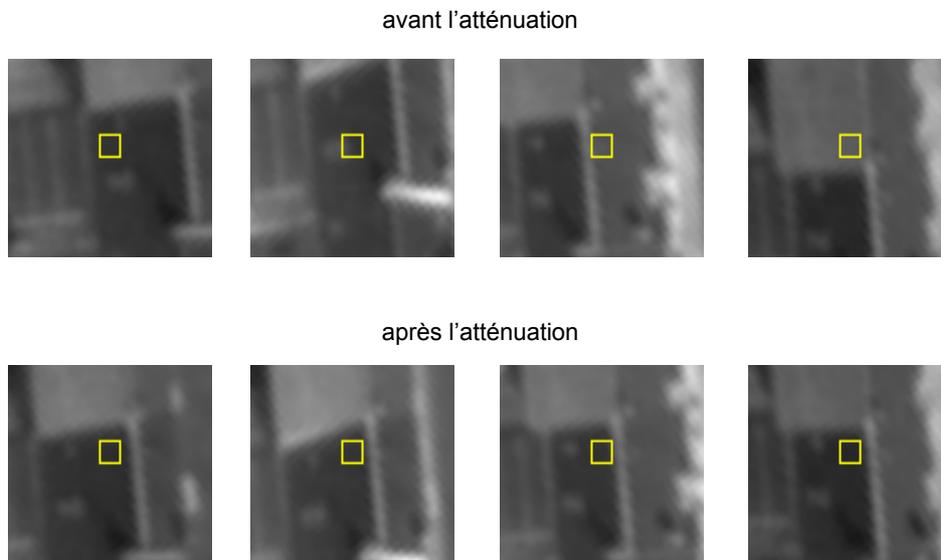


figure B.3.2

Comparaison des homologues trouvés avant et après atténuation. Le petit rectangle représente l'emprise de la fenêtre de corrélation dans l'image. Ici une fenêtre 3 x 3.

Résultats et commentaires

L'augmentation du nombre d'observations permet, d'une part, de réduire de manière considérable les ambiguïtés d'appariement que l'on rencontre en stéréoscopie et par conséquent d'accroître la fiabilité du processus. Elle permet, d'autre part, grâce à la qualité des images de la caméra numérique de l'IGN, d'utiliser des tailles de fenêtres de corrélation de 3 x 3 (voir figure B.3.3).

On peut constater sur les résultats que le MNS est dense, que les micro-structures du relief sont bien restituées, et que les discontinuités sont bien localisées. Toutefois, la petite taille de la vignette est à l'origine d'appariements aberrants dans les zones très homogènes qui n'apparaissent pas avec une fenêtre 5 x 5 (voir figure B.3.4). Par contre, une fenêtre 5 x 5 restitue moins bien les micro-structures du relief et les discontinuités.

Travailler depuis l'espace objet présente de nombreux avantages. On peut travailler de manière transparente sur des images de résolutions différentes et les paramètres s'expriment sous forme métrique. On évite également le rééchantillonnage en aveugle des échantillons 3-D issus de l'appariement stéréoscopique des images afin de constituer une grille MNS régulière dans l'espace objet.

En effet, ces échantillons, issus classiquement d'une mise en correspondance guidée depuis l'espace d'une image, ont par construction une distribution spatiale irrégulière. Enfin, son avantage principal pour notre étude est qu'il permet d'une part de traiter N images de manière naturelle et transparente et d'autre part de construire en même temps le MNS et l'ortho-image associée (voir figure B.3.5).

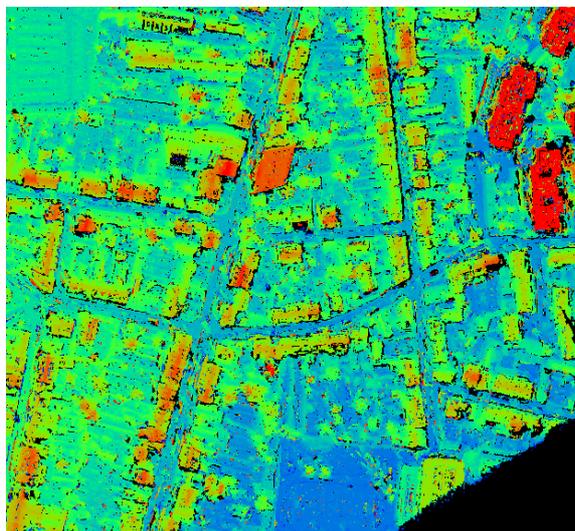


figure B.3.3

MNS avec quatre images et avec une fenêtre 3 x 3.

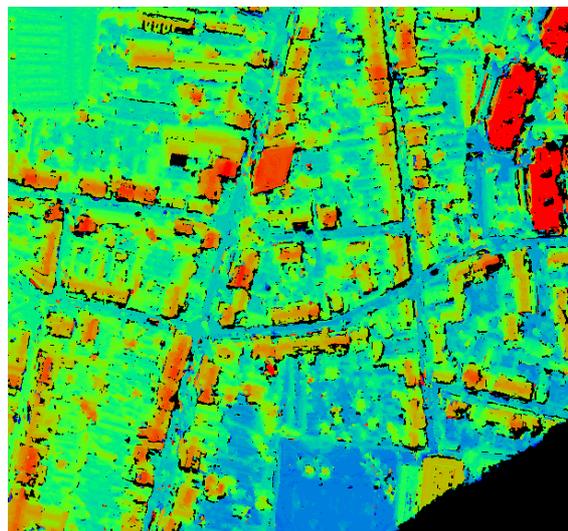


figure B.3.4

MNS avec quatre images et avec une fenêtre 5 x 5.



figure B.3.5

Ortho-image construite avec le MNS de la figure B.3.3 (Mission du Mans avec 40 cm de résolution et un recouvrement latéral et longitudinal de 50%).

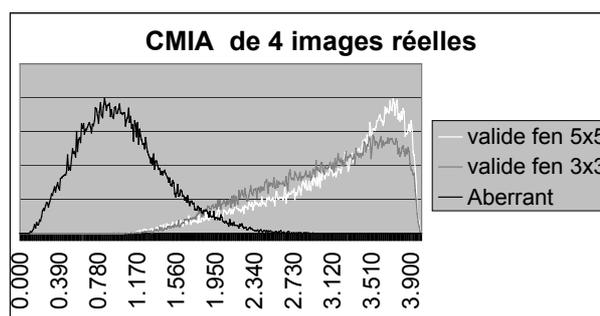


figure B.3.6

Histogramme des coefficients de corrélation.

“ Auto-évaluation ” des mesures et filtrage automatique des points aberrants

Bien entendu, le coefficient de ressemblance multi-images ne donne pas une probabilité mais un bon auto-indicateur de la fiabilité de la mesure. Les figures B.3.7 et B.3.8, page suivante, montrent que les points aberrants du MNS ont des coefficients de corrélation plus faibles. Une expérience simple d'analyse des distributions de coefficients de corrélation le montre de manière plus nette.

Considérons les distributions des coefficients réels trouvés et aberrants. Nous appelons coefficients réels, les coefficients de corrélation issus de notre processus, et coefficients aberrants, les coefficients de corrélation obtenus par le même processus tout en se plaçant délibérément dans un intervalle altimétrique de même amplitude mais ne contenant pas le relief. On peut observer que les deux distributions sont peu mélangées (voir figure B.3.6). D'après l'observation des courbes on peut dire que les points avec des scores de corrélation au dessus de 2,95 sont quasiment sûrs à 100 % et ceux au dessous de 1,0 sont faux à 100%. Entre les deux ?

La relative séparation des distributions dans le cas du multi-vues permet de définir un critère de filtrage valide (voir figure B.3.9, page suivante). On notera que la séparation des deux distributions est d'autant plus importante que le nombre d'images est important. Si l'on se ramène à un traitement stéréoscopique le mélange des distributions est très important ce qui explique la difficulté et l'impossibilité à définir un critère de fiabilité et un seuil de rejet satisfaisant sur la valeur du coefficient de corrélation. Un seuil bas conserve un grand nombre de points aberrants. Un seuil haut rejette un très grand nombre de points valides.

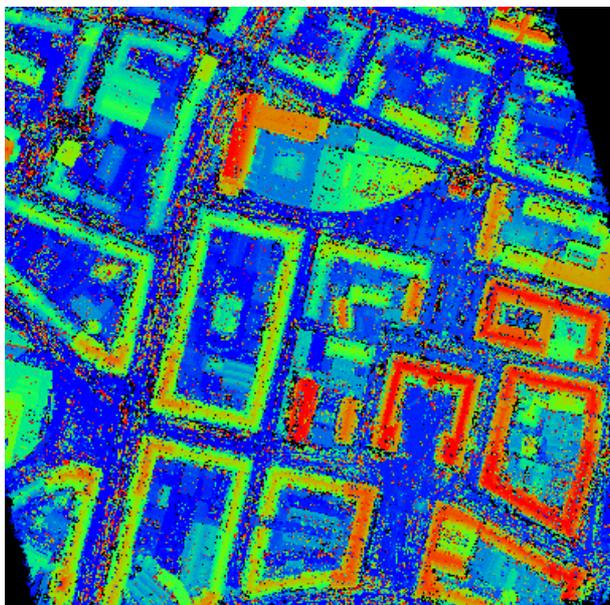


figure B.3.7

MNS brut (sans filtrage) obtenu avec quatre images et avec une fenêtre 3 x 3, (mission sur Amiens avec 40 cm de résolution et un recouvrement latéral et longitudinal de 60%).



figure B.3.8

Coefficients de corrélation.

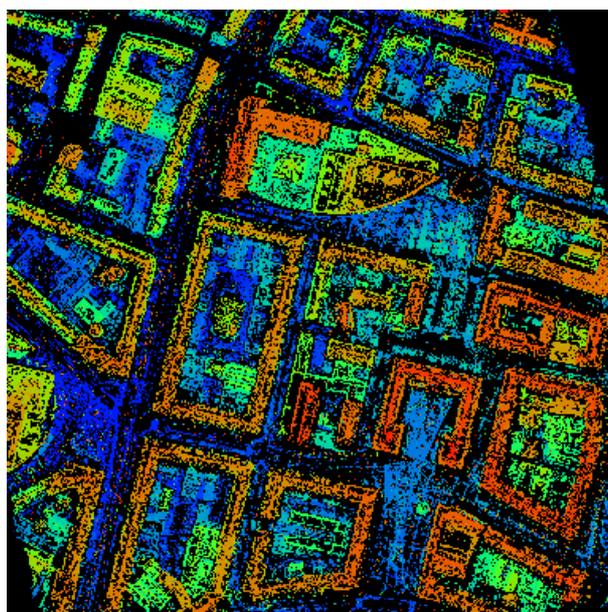


figure B.3.9

MNS filtré avec un seuil de 2,95 sur le CMIA.

Travaux en cours : gestion des zones manquantes

La fonction de pondération radiométrique que nous avons décrite précédemment pénalise bien entendu les zones qui ne sont vues (parties cachées) ou plutôt qui ne sont "bien vues de la même manière" (surfaces spéculaires, véhicules mobiles) que dans un sous-ensemble d'images.

Notre processus d'appariement tend volontairement à restituer uniquement les points du paysage vus de façon assez semblable sur les n images simultanément. Aussi, il restera des trous de corrélation sur un certain nombre de zones : zones homogènes, parties masquées dans une ou plusieurs images, zones liées aux véhicules mobiles, surface ayant donné lieu à des réflexions spéculaires, etc.

Aussi notre stratégie générale sera de compléter progressivement et hiérarchiquement (par rétroaction) le MNS à partir des mesures les plus sûres (à l'aide du filtrage) afin d'éviter la propagation des erreurs dans les traitements.

Pour restituer les zones homogènes on peut recommencer le même processus (corrélation, pondération, filtrage) avec des tailles de vignettes plus grandes (5 x 5 et 7 x 7). De manière à compléter les zones encore manquantes, on applique localement la même stratégie mais sur un sous-ensemble déterministe d'images.

Pour les parties cachées, on détermine à l'aide des échantillons sûrs du MNS et d'un algorithme de z-buffer, le sous-ensemble d'images sur lequel un point du MNS est vu et on applique le même processus que précédemment mais limité à ce sous-ensemble d'images. Pour les surfaces spéculaires et véhicules mobiles, on prend la médiane de tous les coefficients calculés sur tous les sous ensembles possibles de $n - 1$ images. Le traitement hiérarchique de ces zones est un travail en cours.

Conclusion

Ce nouveau prototype de corrélateur, quoique très simple en termes de mise en œuvre et de stratégie, donne des résultats très prometteurs avec des propriétés particulièrement intéressantes pour la production d'ortho-images, pour la détection de micro-structures du relief, et pour la reconstruction du bâti. D'une part, les MNS restitués sont denses, fiables, précis et reproduisent correctement la morphologie du relief (discontinuités, pentes importantes, ruptures de pentes, micro textures 3-D, etc.). D'autre part, on possède pour chacune des mesures du MNS, un indicateur de la "fiabilité" qui peut être utilisé soit pour une rétro-action directe sur nos algorithmes et une vraie stratégie hiérarchique, soit pour mettre en évidence des zones "incertaines", afin que d'autres traitements qui s'appuient sur les MNS puissent en tenir compte.

Perspectives

Jusqu'à présent dans cette étude, le processus de détermination altimétrique a été indépendant pour chaque (x,y). La valeur retenue pour chacun de ces processus correspond au maximum de corrélation du profil. Bien que la multi-corrélation permette de faire sortir distinctement les bons maxima la plupart du temps, il arrive que la bonne solution se trouve dans les maxima secondaires.

Une des perspectives sera de conserver pour chaque processus, un ensemble de valeurs de Z pour lesquelles on observe des maxima locaux du coefficient de corrélation et on utilisera des techniques d'optimisation locales ou globales (relaxation, programmation dynamique, ou autres) dans l'espace objet de manière à étudier la cohérence spatiale de ces maxima dans un voisinage de (x,y) afin de déterminer une "meilleure" solution pour chaque mesure.

Références

- [BAGHLI 99] I. Baghli : *Reconstruction de Modèles Numérique d'Élévation à partir d'images aériennes multi-vues panchromatique*, rapport de stage, DEA de traitement du signal et des images, ENSEA-UCP, septembre 1999.
- [CANU et al 95] D. Canu, N. Ayache & J.-A. Sirat : *Accurate and robust stereovision with a large number of aerial images*, SPIE, pp. 152- 160, Paris, 1995.
- [FOURNIER 99] J. Fournier : *Analyse 3-D multi-vues de scènes urbaines en imagerie aérienne haute résolution*, rapport de stage, DEA de traitement du signal et des images, ENSEA-UCP, septembre 1999.
- [FUCHS et al 99] F. Fuchs, H. Le Men : *Building reconstruction on aerial images through multi-primitive graph matching*, in Proceedings of the 2nd IAPR workshop on graphbased representations, laboratoire MATIS, IGN SR 990023/C-COM, 1999.
- [GABET et al 94] L. Gabet, G. Giraudon & L. Renouard : *Construction automatique de Modèles Numériques de Terrain à haute résolution*, in Bulletin SFPT n° 135, 1994.
- [LELOGLU et al 98] U.M. Leloglu, M. Roux & H. Maître : *Dense urban DEM with three or more high resolution aerial images*, ISPRS Symposium on GIS, Between Vision and applications, Stuttgart (D), septembre 1998.
- [MAYER 98] D. Mayer : *Fusion de résultats de corrélation*, rapport de stage, DEA Sciences de l'Information Géographique, ENSG-ENST-Université de Marne-la-Vallée, laboratoire MATIS, IGN SR 9800 /C-STA, septembre 1998.
- [OKOTUMI et al 91] M. Okotumi and T. Kanade : *Multiple Baseline Stereo*, IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 15, n° 4, avril 1993.

Publications

- [CORD et al 98] M. Cord, N. Paparoditis & M. Jordan : *Dense, reliable and depth discontinuity preserving DEM computation from H.R. V. images*, in Proceedings of ISPRS Commission II symposium, Data Integration : Systems and techniques, vol. 32, n° 2, Cambridge (UK), laboratoire MATIS, IGN SR 980040/C-COM, juillet 1998.
- [JIBRINI et al 00] H. Jibrini, M. Pierrot Deseilligny, N. Paparoditis & H. Maître : *Reconstruction 3-D de bâtiments à partir de données cadastrales vectorisées et d'images aériennes*, RFIA'2000, pp. 299-306, laboratoire MATIS, IGN SR 00-002/C-COM-HJ, février 2000.
- [PAPARODITIS et al 98] N. Paparoditis, M. Cord, M. Jordan and J.-P. Cocquerez : *Building detection and reconstruction from mid and high resolution images*, in Journal of Computer Vision and Image Understanding, vol. 72, n° 2, pp. 122-142, laboratoire MATIS, IGN SR 980039/C-ART, novembre 1998.

B.4 Mesures entre objets surfaciques. Application à la qualification des liens d'appariement

Atef Bel Hadj Ali

Introduction

L'information géographique numérique est souvent entachée d'erreurs.

Ces erreurs sont généralement de nature différente, que nous pouvons classer d'une manière caricaturale en deux grandes classes :

- erreurs d'origine humaines, causées par l'opérateur lors des phases de saisie, d'interprétation ou d'analyse,
- erreurs causées par la machine, ces erreurs sont dues au manque de précision des instruments de mesures ou bien souvent au mode de stockage des coordonnées dans les bases de données numériques avec tous les problèmes de résolution qui leur sont rattachés [VAUGLIN 99].

Également, le fait de considérer les entités géographiques comme des entités bien définies dans l'espace, en les modélisant d'une manière rigide (Crisp modeling en anglais), peut induire des incertitudes supplémentaires [ALESHEIKH 99]. En effet, la définition des entités géographiques est le plus souvent sujet à une modélisation par les techniques dites "floues", du fait que certaines primitives ne peuvent être jamais définies d'une façon exacte (exemple: les contours des lacs, des forêts, etc.).

Le volet sur les techniques floues et leur implications sur l'exactitude de l'information géographique ne sera pas traité dans cet article. Ne sera traitée ici que l'évaluation de la qualité géométrique des entités surfaciques. Ces entités seront considérées comme bien définissables dans l'espace du fait que les tests ont été menés sur des entités de la classe "bâti" que l'on considère comme bien définissables.

L'évaluation de la qualité géométrique des entités surfaciques englobe deux aspects majeurs du contrôle qualité: le contrôle de la qualité de position de l'entité et le contrôle de la qualité de sa forme. Ces deux aspects sont fortement liés du fait que l'on ne peut pas accepter un objet qui soit bien positionné dans l'espace (par rapport à une référence) et dont la forme ne correspond pas à la réalité et *vice versa*.

La figure B.3.1 illustre un exemple de polygone dont la qualité de sa position est parfaite avec une forme qui ne correspond pas à ce que l'entité doit avoir. Dans cet article, nous exposerons de manière brève, le processus d'appariement utilisé en amont de la phase de contrôle qualité, ainsi que le prototype développé, tout en exposant également les pistes à développer essentiellement pour la détection et la construction des appariement de type n:m.

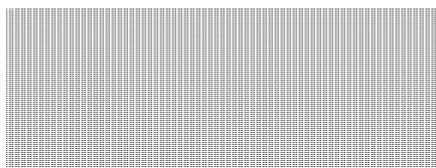


figure B.3.1 : position et forme

Les primitives géométriques sont généralement représentées par des listes de points, or, cette représentation ne rend pas compte de la géométrie des objets - au sens de la forme - mais, elle se contente simplement de les stocker. En effet, on présente les modélisations utilisées pour passer de l'espace cartésien à un autre espace dont la modélisation peut rendre compte de la forme des entités. Aussi, on présente les distances associées à ces espaces de représentation et qui permettent de mesurer les disparités de forme et de position entre les entités pré-appariées.

Finalement, on présente une application pratique utilisant quelques-unes des modélisations et des mesures pour qualifier les liens d'appariement entre deux bases de données géographiques. La qualification des liens d'appariement est une opération qui est, à mon sens, très généraliste et dont l'intérêt est considérable pour toutes les applications qui viennent en aval du processus d'appariement.

À titre d'exemple, l'opération de qualification des liens d'appariement est bénéfique pour les opérations de contrôle qualité des bases de données dans le sens où les contrôles ne seront effectués que sur les objets dont la qualité de son lien est bonne, cependant les objets dont les liens d'appariement présentent une qualité moins bonne ou mauvaise interviennent dans le contrôle tout en les accordant un faible taux de confiance.

Une autre application, dont la qualification des liens d'appariement peut s'avérer bénéfique est l'opération de mise à jour. À titre d'exemple, tous les objets contribuant à un lien d'appariement de faible qualité peuvent évoquer une modification géométrique de l'entité en question dans le sens où elle a subi une extension ou une modification géométrique telle qu'elle soit.

Approche

Pour traiter la géométrie, les systèmes d'information géographique actuels s'articulent autour de la notion du point, c'est-à-dire, que les primitives géométriques sont généralement modélisées sous forme d'une liste de points. Lors du calcul ou lors de la visualisation des jeux de données les points intermédiaires sont reconstitués par interpolation entre les points déjà stockés dans la base. Cependant, il se trouve que les entités surfaciques "géographiques" sont trop complexes pour être définies comme précédemment.

En effet, cette définition n'englobe que les polygones convexes ou concaves dits "simples". Le terme simple signifie que le polygone ne présente pas de trous et ne participe à la formation d'aucun agrégat. Par ailleurs, nous attirons l'attention que les polygones simples ne sont pas qu'une liste de points ou de lignes et donc les représenter par d'autres modélisation est une étape nécessaire.

La figure B.4.2 donne quelques exemples de types des entités surfaciques. Le deuxième type d'objet complexe (figure B.4.2c) représente les agrégats de polygones qui sont rencontrés dans le cas où l'on apparierait deux bases de données qui non pas la même résolution (exemple : entre BD Topo et BD Carto ou entre Cadastre et BD Topo).

Il ressort donc très clairement que les entités géographiques se présentent elles-mêmes comme des agrégats d'entités simples ou complexes, et le problème se pose, tant au niveau de leur codification (modèles utilisés) dans la base de données, qu'au niveau de leur traitement (essentiellement pour le contrôle de qualité), vu leur spécificité.

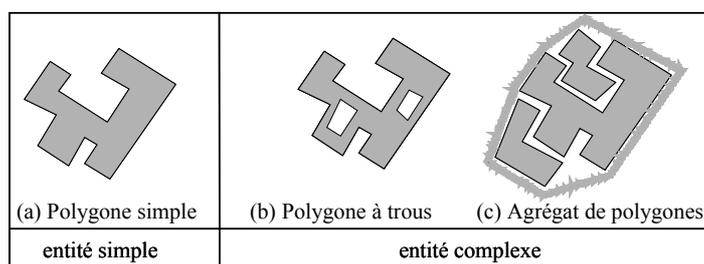


figure B.4.2 : différents types de configuration de polygone

L'approche qu'on propose dans le cadre de cette étude pour qualifier la géométrie des entités surfacique repose sur trois étapes :

- modélisation de la géométrie des entités,
- mesures entre les couples d'entités homologues,
- exploitation de ces mesures selon l'application.

Dans le cadre de cette étude l'application consiste à qualifier les liens d'appariement entre les objets de deux bases de données. Cette approche est illustrée par la figure B.4.3.

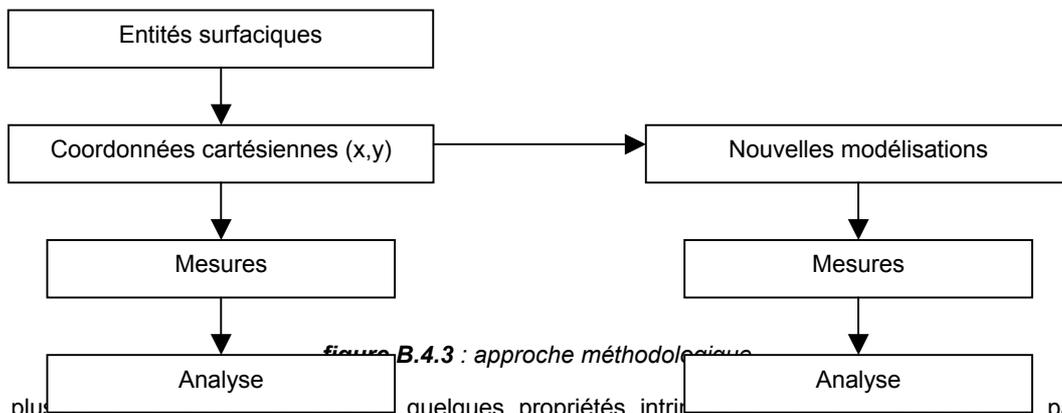


Figure B.4.3 : approche méthodologique

En plus de la possibilité de mesurer quelques propriétés intrinsèques à l'entité cartésienne, à partir de sa modélisation, il est nécessaire de définir dans chaque espace de représentations une métrique afin de pouvoir comparer les entités entre elles.

Le tableau B.4.1 illustre les modélisations ainsi que les métriques qui leur sont associées. On voit également le type d'entité qui peut être traité par chacune.

	Objet simple	Objet complexe	Distance
Modèle cartésien (Vecteur)	✓		* Hausdorff entre polygones * Fréchet * Distance surfacique
Modèle cartésien (Raster)	✓	✓	* Hausdorff entre surfaces * Distance surfacique
Modèle angulaire	✓		* Norme L2
Modélisation par lissage gaussien	✓		<i>Métriques en cours de définition</i>
Modèle fréquentiel	✓		
Modélisation par les moments	✓	✓	
Modélisation par les distances radiales	✓		

Les définitions de ces modélisations et de ces distances sont données plus loin dans l'article.

Appariement des entités surfaciques

L'estimation de la qualité d'une base de données géographiques, consiste à la comparer à une base de données de référence dont on connaît la qualité ou que l'on estime présenter une qualité meilleure que celle à contrôler. L'estimation se fait en calculant l'écart entre les objets de la base de données et leurs "homologues" dans la base de référence. Donc, avant de procéder à l'estimation de la qualité, une opération de mise en correspondance ou d'une recherche des objets homologues s'impose. Cette opération qui vient naturellement en amont de la phase d'estimation est appelée "phase d'appariement"

L'appariement des données géographiques est le processus qui consiste à établir des liens de correspondance entre les objets géographiques représentant les mêmes phénomènes du monde réel mais provenant de deux jeux de données différents. Cependant, il existe trois types d'appariement : l'appariement géométrique, l'appariement topologique et l'appariement sémantique. Ces techniques d'appariement peuvent être utilisées séparément ou complémentaires.

Dans le cadre de notre étude, on ne s'est intéressé qu'à l'appariement géométrique. Un algorithme d'appariement a été développé. Cet algorithme est amplement détaillé dans [BEL HADJ ALI 97] [BEL HADJ ALI, VAUGLIN 99]. Notons que deux prototypes ont été développés : un, en Aml, qui fonctionne dans l'environnement ArcInfo, et l'autre, qui fonctionne comme une extension pour le logiciel Arcview d'Esri.

L'appariement des deux jeux de données représentant des entités surfaciques commence en prime abord par la détection des liens d'associations entre les entités des deux jeux, dans le but de construire un graphe d'association. Deux objets sont sensés avoir un lien d'association *si et seulement si* la surface de leur intersection est non nulle. La construction du graphe est illustrée par la figure B.4.4 (cette condition est utilisée comme une hypothèse de l'algorithme, bien qu'elle reste sujette à discussions, notamment en la présence d'un biais considérable qui fait que les objets ne se croisent pas).

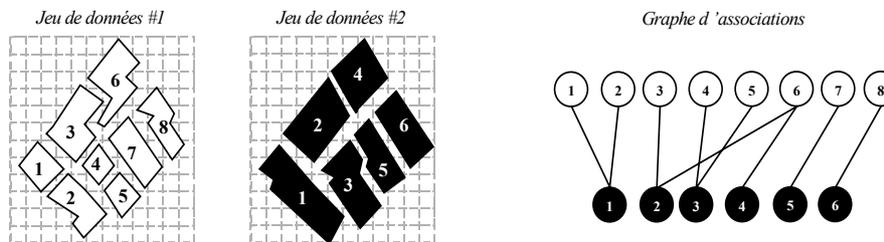


figure B.4.4 : construction du graphe d'association

Lors de la construction du graphe, aucun poids n'est affecté aux arêtes. Cependant, on remarque qu'il pourrait exister des liens d'associations invalides (tel que le couple (6₁,2₂). Ces liens ne reflètent pas la réalité, et qui sont dus,

soit à une généralisation " brutale " d'une entité ou à une mauvaise interprétation de l'emprise de l'entité (due à un problème d'ombre sur la photographie aérienne, par exemple. Ces liens devront donc être supprimés du graphe. L'élimination de ces liens est précédée d'une étape d'affectation des poids aux arêtes du graphe. Ce poids est défini par une fonction appelée " fonction d'inclusion " [BEL HADJ ALI 97] et qui est définie ci-dessous.

Soit A un objet du premier jeu de données et B un objet du deuxième jeu de données tel que $S(A \cap B) \neq 0$. On définit la fonction d'inclusion de la manière suivante :

$$F_i(A,B) = \frac{S(A \cap B)}{\min(S(A), S(B))} \quad (1)$$

Les valeurs de la fonction d'inclusion seront affectées aux arêtes du graphe. Un seuil a été fixé sur ces valeurs pour supprimer les liens inutiles dont la valeur est fixée à 0,45 : si le pourcentage d'inclusion d'une entité dans l'autre est inférieur à 45% l'arête qui lie les deux objets dans le graphe sera supprimée.

Une fois le graphe purgé, on procède à une recherche des agrégats homologues entre les deux jeux de données. Cette recherche se fait dans les deux sens, c'est-à-dire, rechercher les liens 1:n du jeu 1 vers le jeu 2 et puis rechercher les liens m:1 dans l'autre sens.

On note que les agrégats sont construits à la base à partir des appariements de type 1:1 ce qui ne permet pas de détecter certaines configurations n:m utiles. Ce problème peut être résolu en effectuant des groupements *a priori* par l'utilisation des arbres de recouvrement minimal, par exemple [REGNAULT 98] et d'effectuer un appariement macroscopique entre ces arbres, en un premier temps, qui sera affiné par un appariement microscopique entre entités simples dans un deuxième temps.

Il est à noter que les liens d'association sont stockés dans une table dite " table d'appariement " et qui est constituée de deux colonnes dans lesquelles sont stockés les identifiants des entités de chaque jeu de données.

Modélisations et mesures

Une fois les liens d'appariement établis, on passe à l'étape de contrôle qualité. Comme il a été mentionné dans l'introduction, le contrôle de la qualité géométrique des entités surfaciques englobe le contrôle de leur position et de leur forme. Ces deux types de contrôle peuvent être fusionnés par la suite pour en dégager une indication globale sur la qualité géométrique " globale " de l'entité.

Concernant l'évaluation de la forme, il se trouve que l'espace euclidien est loin d'être le plus approprié comme espace de représentation [CLEMENTINI 97]. À cet effet, on a essayé de représenter les entités surfaciques par des modélisations autres que la représentation habituelle sous forme d'une liste chaînée de coordonnées des points composant leur contours

Aussi les modélisations que nous dédions à l'évaluation de la forme doivent respecter les propriétés suivantes :

- elle doit être invariante aux transformations par translation, rotation et changement d'échelle (homothétie), du fait que les formes d'une entité et de son image par les transformations citées sont les mêmes.

Les indicateurs de similarités qui leur sont associés doivent également respecter les propriétés suivantes :

- ils doivent avoir un temps de calcul raisonnable,
- ils doivent donner un résultat proche de ce que l'utilisateur peut obtenir visuellement (c'est-à-dire, capable de traduire au mieux le mécanisme cognitif de l'être humain),
- il est préférable qu'ils aient les propriétés d'une distance mathématique.

Les modélisations étudiées ultérieurement sont fondées soit, sur le contour, soit, sur la région de l'entité surfacique. On commence par présenter la modélisation la plus triviale et la plus utilisée dans la plupart des systèmes

d'information géographique actuels, qu'est la modélisation par une liste chaînée de points ainsi que les mesures qui lui sont associées.

Liste chaînée de points (modèle cartésien)

La modélisation sous forme d'une liste chaînée de points est la modélisation la plus utilisée actuellement par les SIG. Elle est le plus souvent sollicitée pour le stockage des primitives géométriques dans les BDG. Une entité surfacique peut avoir autant de points que l'opérateur " veut saisir " sans toutefois changer sa forme (point intermédiaire se situant d'une manière colinéaire). Cependant l'opérateur est limité par les spécifications de saisie, qui stipulent dans la plupart des cas la distance minimale entre deux points consécutifs. Or, en recherchant la perfection dans la saisie de l'entité géographique, les opérateurs ne respectent pas ces règles).

À cette modélisation, nous pouvons associer toutes les mesures qui s'articulent à la base sur la distance euclidienne. Dans le cadre de cette étude on a utilisé les distances de Hausdorff [ABBAS 94] et de Fréchet (en cours de test) dont nous donnons les définitions plus loin.

Fonction angulaire (modèle angulaire)

La fonction angulaire est définie par Arkin [ARKIN et al 91] comme une fonction qui décrit l'entité surfacique à travers les angles formés par les segments qui composent son contour. Donc, pour le traitement de l'entité en vue de la qualification de sa forme, on utilise sa fonction angulaire correspondante et non sa définition en une liste chaînée de points.

La fonction angulaire qu'on note $\theta(s)$ donne l'angle de la tangente dans le sens trigonométrique comme fonction de la longueur de l'arc s , mesuré à partir d'un point de référence 0 situé sur le contour (figure B.4.5). Ainsi, $\theta(0)$ donne l'angle v formé par la tangente au point de référence 0 avec un axe de référence associé au polygone. La longueur du contour est normalisée, les distances entre le point de référence et les sommets parcourus évoluent entre 0 et 1.

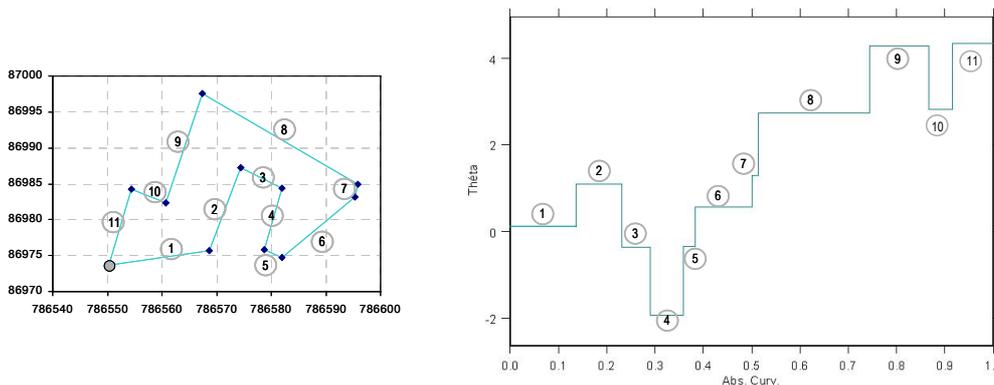


figure B.4.5 : fonction angulaire

Cette modélisation présente les propriétés suivantes :

- à chaque polygone on peut associer une fonction unique et *vice-versa*,
- la fonction angulaire est invariante par translation et homothétie isotrope. La rotation du polygone d'un angle α se traduit par l'ajout de la valeur de cet angle sur tous les paliers de la fonction angulaire,
- la fonction angulaire d'un polygone convexe est croissante et monotone.

Signature du polygone (fonction à distances radiales)

La fonction à distances radiales est une fonction qui mesure la distance de chaque point du contour au centre de masse de l'objet [BEL HADJ ALI 97]. Pour la construction de cette fonction, on doit échantillonner le contour du polygone avec un pas constant. Le choix du pas d'échantillonnage influe remarquablement sur la construction de la signature, c'est-à-dire, si le pas est grand, on risque d'omettre les petits détails du contour.

Par ailleurs, si le contour de l'objet est suffisamment échantillonné, les bruits de faible amplitude qui affecte ce dernier seront représentés sur la signature par des faibles variations. Cette fonction est périodique de période égale à la longueur du contour de l'objet (ou à l'unité si le contour est normalisé), elle est insensible à la translation et à la rotation de l'objet.

Si l'objet subi une homothétie isotrope de facteur k , sa nouvelle fonction à distances radiales sera égale à l'ancienne fonction multipliée par la valeur du facteur k . Outre ces propriétés d'invariance, la propriété de l'unicité de représentation est assurée par ce genre de modélisation. Il existe donc une parfaite bijection entre l'espace des formes des objets et l'espace des fonctions à distances radiales.

La figure B.4.6 illustre la représentation d'un polygone sous la forme d'une fonction à distances radiales, que nous convenons d'appeler "signature polygonale".

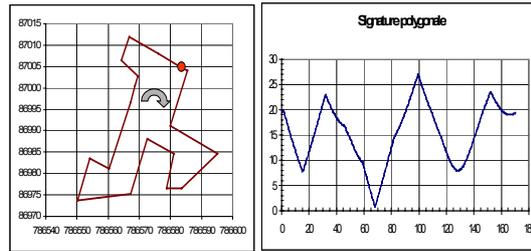


figure B.4.6 : signature d'un polygone

Descripteurs de Fourier (modèle fréquentiel)

L'utilisation de l'espace des fréquences comme espace de travail est amplement rencontrée dans le domaine de traitement de signal à des fins de filtrage ou de compression de données. Parmi les applications géographiques utilisant cette technique nous citons la modélisation des objets géographiques par les descripteurs de Fourier de la fonction de courbure qui a été utilisée par Fritsch [FRITSCH 94] pour des fins de généralisation des entités géographiques linéaires.

Étant représenté à l'origine par une série de n points équirépartis $\{(x(i), y(i)), i = 0, 1, \dots, n-1\}$ dans l'espace cartésien, le polygone sera représenté dans l'espace des fréquences par une série de fréquences caractérisées par leurs amplitudes et leurs angles de phase.

Le passage de l'espace cartésien à l'espace des fréquences est défini par la transformée de Fourier discrète de la façon suivante :

$$U(k) = \sum_{i=0}^{n-1} u(i) e^{\frac{-j2\pi ki}{n}} = M(k) e^{j\theta(k)}; 0 \leq k \leq n-1 \quad (2)$$

avec $u(i) = x(i) + jy(i)$, $M(k)$ et $\theta(k)$ représentent respectivement l'amplitude et l'angle de phase.

Les informations relatives à l'entité sont à présent contenues dans les descripteurs de Fourier. À titre d'exemple, la fréquence nulle est porteuse de l'information sur la mesure de l'aire de l'entité, les deux premières fréquences donnent l'ellipse caractéristique qui représente l'entité.

La figure B.4.7 illustre un exemple d'un polygone avec les descripteurs de Fourier qui lui correspondent, ainsi qu'une reconstruction du polygone par l'utilisation de quelques descripteurs.

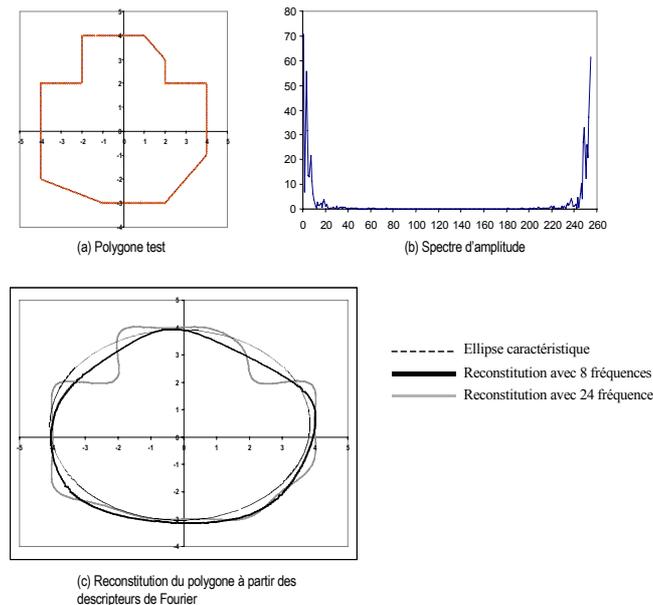


figure B.4.7 : descripteurs de Fourier

Moments

À la différence des modélisations précédentes qui étaient essentiellement locales, nous considérons dans ce paragraphe des modélisations globales exprimées sous formes d'intégrales le long du contour de silhouette de l'entité surfacique ou bien sur l'intérieur du domaine de l'entité délimité par sa silhouette.

Les techniques basées sur la modélisation des entités surfaciques par les moments sont largement utilisées dans le domaine de reconnaissance des formes et de la vision robotique pour reconnaître la forme des objets. Cette modélisation se présente sous la forme d'un ensemble de moments calculés à partir de l'entité à modéliser.

D'une manière schématique, les propriétés des moments d'une entité présentent une forte analogie avec ceux utilisés en statistique et en mécanique. Par exemple, les moments d'ordre 0 et 2 d'une fonction de densité de probabilité représentent respectivement la probabilité et la variance de la fonction, en mécanique ces moments donnent respectivement la masse totale et les valeurs des moments d'inertie.

Donc, en considérant l'entité surfacique comme une distribution d'intensité bi-dimensionnelle, les moments d'ordre 0 et 2 des valeurs des pixels de l'entité donnent d'une manière similaire la surface totale de l'entité ainsi que l'orientation de ses axes d'inertie dans l'espace de représentation.

Définition générale

Une entité surfacique peut être considérée comme une fonction de distribution bi-dimensionnelle de densité qu'on désigne par $f(x,y)$. Cette fonction représente l'intensité du pixel aux coordonnées (x,y) .

Soit ξ la région qu'occupe l'entité dans l'espace cartésien, et qui représente le domaine de définition de la fonction $f(x,y)$. La définition générale des moments Φ_{pq} d'ordre $p+q$ de la fonction $f(x,y)$ est donnée par :

$$\Phi_{pq} = \iint_{\xi} \Psi_{pq}(x,y) f(x,y) dx dy \quad p,q = 0,1,2,3,\dots \quad (3)$$

$\Psi_{pq}(x,y)$ est une fonction continue sur ξ . Les indices p et q représentent les degrés des monômes en x et y au sein de la fonction Ψ .

Pour une entité donnée, la fonction d'intensité $f(x,y)$ est bornée et compacte sur ξ , et donc l'intégrale donnée par l'équation 2 aura des valeurs finies, ceci nous amène également à dire que la "masse totale" de la distribution est positive. Cette "masse totale" est donnée par :

$$f = \iint_{\xi} f(x,y) dx dy \quad (4)$$

Cependant, on peut rencontrer dans la littérature une large panoplie de définitions des moments. La définition des moments donnée par l'équation 3 peut être exprimée selon le système d'axes utilisé. Par exemple, l'utilisation des coordonnées polaires (r,θ) nécessite de redéfinir les moments en accord avec cette représentation, et donc ces moments seront donnés par :

$$\Phi_{pq} = \iint_{\xi} r^{p+q+1} \Psi_{pq}(\theta) f(r,\theta) dr d\theta \quad p,q = 0,1,2,3,\dots \quad (5)$$

Moments géométriques

La fonction centrale à partir de laquelle sont définis les moments géométriques est basée sur les coordonnées des pixels de l'entité à modéliser. L'avantage de la modélisation des entités par des moments géométriques réside dans le fait que toute transformation affectant l'entité peut être facilement détectable dans l'espace de ces moments. Leur calcul est relativement simple à mettre en œuvre relativement à ceux définis par des fonctions complexes.

On rencontre dans la littérature les termes "moments cartésiens" et "moments réguliers" qui ne sont en fait qu'une autre appellation des moments géométriques.

Ces moments sont donnés par l'équation suivante :

$$m_{pq} = \iint_{\xi} x^p y^q f(x,y) dx dy \quad p,q = 0,1,2,\dots \quad (6)$$

m_{pq} désignent les $(p+q)$ -èmes moments géométriques de l'entité modélisée, ξ représente le domaine de définition de la fonction d'intensité $f(x,y)$.

Ce type de moments est très sensible aux transformations affines que subit l'entité, c'est-à-dire, les moments géométriques d'une entité et ceux de son image par transformation affine telle qu'elle soit ne sont pas identiques. Ce problème rend les moments géométriques inexploitable comme indicateur de forme, car ils ne respectent pas la propriété de l'invariance. Donc, pour palier à cet effet indésirable, il faut rendre ces moments invariants par transformations affines (à savoir, translation, rotation et homothétie).

On rencontre dans la littérature plusieurs types d'invariants, cependant les plus utilisés sont les invariants de Hu [HU 62].

Moments orthogonaux

Par opposition aux moments géométriques qui sont définis par rapport à une base quelconque $(x^p y^q)$, les moments orthogonaux, comme leur nom l'indique, sont définis dans une base orthogonale, ce qui évite la redondance des informations portées par chacun des moments.

Les deux types de moments orthogonaux les plus utilisés sont : les moments de Legendre et les moments de Zernike, dont nous donnons les définitions ci-dessous.

Moments de Legendre

La fonction centrale sur laquelle se basent les moments de Legendre est celle que définit les polynômes de Legendre avec x et y évoluant dans un disque de rayon l'unité.

À chaque polygone est associé un ensemble unique de moments de Legendre. Donc, étant donné la propriété d'orthogonalité de ces moments peut reconstruire l'objet en utilisant les moments qui lui correspondent.

Moments de Zernike

Ce type des moments a été initialement introduit par Teague [TEAGUE 80] et qui sont basés sur les fonctions polynomiales de Zernike. Ils se distinguent, par rapport aux moments géométriques et de Legendre, par leur complexité de calcul. Par ailleurs, la capacité de représentation est plus fiable et cela grâce à leur faible sensibilité aux bruits (une propriété intéressante pour la reconnaissance des formes).

Les moments orthogonaux de Zernike d'ordre p sont définis de la manière suivante :

$$Z_{pq} = \frac{(p+1)}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} V_{pq}^*(r, \theta) f(r, \theta) r dr d\theta$$

avec $r \leq 1$, $p \in \mathbb{N}^+$ et $q \in \mathbb{N}$, tel que $p - |q|$ est un entier pair et $|q| \leq p$ (7)

Les fonctions $V_{pq}(r, \theta)$ représentent les polynômes de Zernike d'ordre p avec une répétition q . L'astérisque représente la fonction complexe conjuguée.

Les polynômes de Zernike $V_{nm}(r, \theta)$ d'ordre n sont définis en fonction des coordonnées polaires de la manière suivante :

$$V_{nm}(r, \theta) = R_{nm}(r) e^{im\theta} \quad (8)$$

$$\text{avec : } R_{nm}(r) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n-2s+|m|}{2}\right)! \left(\frac{n-2s-|m|}{2}\right)!} r^{n-2s} \quad (9)$$

avec $n = 0.1.2...., \infty$; $0 \leq |m| \leq n$ et $n - |m|$ un entier pair.

Les polynômes de Zernike sont orthogonaux, et donc les moments correspondants le sont également. Cette propriété d'orthogonalité annule l'effet de redondance de l'information portée par chaque moment.

Modélisation par lissage gaussien

L'appréciation d'une forme dépend très souvent de la distance à laquelle celle-ci est perçue ou, en d'autres termes, du niveau de détails que celle-ci contient. En effet, en appliquant un lissage itératif sur un contour polygonal, on perçoit une suppression des détails fins tout en gardant la forme générale du polygone.

Cette modélisation introduite par Mokhtarian [MOKHTARIAN, MACKWORTH 92], qui associe à un polygone une fonction qui représente le relevé des points d'inflexion du contour en fonction de l'abscisse curviligne à des niveaux de lissage croissants. La fonction construite est souvent appelée "empreinte digitale du polygone" par sa forte ressemblance à une empreinte digitale. La figure B.4.8 illustre un exemple d'une telle fonction.

Celle-ci montre très clairement, qu'à des forts niveaux de lissage conséquents, les deux formes se ressemblent parfaitement (ce qui est illustré par les trois cloches), par contre, à des bas niveaux de lissage, on peut distinguer le bruit qui affecte le contour.

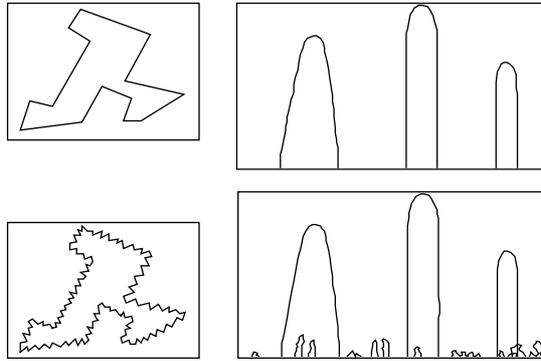


figure B.4.8 : empreinte digitale d'un polygone

Les modélisations déjà présentées permettent de voir la géométrie des entités surfaciques sous un autre angle que celui de l'espace cartésien. En outre, le changement de l'espace de représentation, ces nouvelles modélisations permettent de donner des informations supplémentaires sur la nature de la forme modélisée.

Par ailleurs, la comparaison de ces modélisations nécessite l'établissement des distances qui pourront renvoyer les informations sur les différences qui existent entre deux représentations des deux objets appariés. Dans la section suivante, on présente les distances utilisées pour chacune des modélisations précédemment présentées.

Métriques

Introduction

Dans ce chapitre, nous donnons les définitions de quelques métriques que nous allons utiliser ultérieurement. En effet et avant les définir ces métriques, on rappelle les définitions suivantes.

Distance

Soit Δ l'espace des représentations, une fonction $f : \Delta \times \Delta \rightarrow \mathbb{R}^+$ est dite une distance (entre deux entités δ_A et δ_B) sur cet espace si et seulement si elle respecte les propriétés suivantes :

- la propriété de symétrie, ie, $f(\delta_A, \delta_B) = f(\delta_B, \delta_A)$,
- la propriété de positivité, ie, $f(\delta_A, \delta_B) \geq 0$ et $f(\delta_A, \delta_B) = 0 \Leftrightarrow \delta_A = \delta_B$,
- l'inégalité triangulaire, ie, $f(\delta_A, \delta_B) \leq f(\delta_A, \delta_C) + f(\delta_C, \delta_B)$.

Indice de similarité normalisé

Soit Δ l'espace des représentations, une fonction $f : \Delta \times \Delta \rightarrow [0,1]$ est dite un indice de similarité normalisé (entre deux entités δ_A et δ_B) sur cet espace, si et seulement si, elle respecte les propriétés suivantes :

- la propriété de symétrie, ie, $f(\delta_A, \delta_B) = f(\delta_B, \delta_A)$,
- la propriété de positivité, ie, $f(\delta_A, \delta_B) \geq 0$,
- la propriété de normalisation, ie, $f(\delta_A, \delta_B) = 1 \Leftrightarrow \delta_A = \delta_B$.

Distance de Hausdorff (modèle cartésien)

La distance de Hausdorff entre deux contours C_1 et C_2 est le maximum de deux quantités, la première est le maximum des plus courtes distances (généralement, on utilise la distance euclidienne mais rien n'empêche d'utiliser d'autres distances telle que la distance de Manhattan, par exemple) des points du contour C_1 à l'ensemble des points du contour C_2 , et la seconde est le maximum des plus courtes distances euclidiennes de l'ensemble des points du contour C_2 à l'ensemble des points du contour C_1 .

La définition mathématique de cette distance est la suivante :

$$d_{12} = \sup_{P_1 \in C_1} \{ \inf_{P_2 \in C_2} |P_1 - P_2| \} \quad d_{21} = \sup_{P_2 \in C_2} \{ \inf_{P_1 \in C_1} |P_1 - P_2| \} \quad (10)$$

La distance de Hausdorff est alors le maximum de d_{12} et de d_{21} ; d_{12} et d_{21} sont souvent appelées les composantes de la distance de Hausdorff.

En se basant sur les deux composantes de Hausdorff, Abbas [ABBAS 94] a également défini un indice de généralisation qu'il a défini de la manière suivante :

$$i_G = \frac{d_{21} - d_{12}}{(d_{21} + d_{12})} \quad (11)$$

Cet indice prend ses valeurs dans l'intervalle [-1,1], s'il est voisin de 1, on considère que la généralisation est positive (oubli d'un détail pertinent sur le contour C_1 par rapport au contour C_2). Si l'indice de généralisation est proche de -1, on dit que la généralisation est négative (présence d'un détail inexistant sur le contour C_1 par rapport au contour C_2). Si les deux composantes de la distance de Hausdorff sont grandes, on dit alors qu'il existe une confusion.

La distance de Hausdorff est utilisée comme indicateur pour évaluer la qualité de position. Or on note que la distance telle qu'elle est définie s'opère sur des polygones homologues de type 1:1. Pour les liens 1:n il serait plus judicieux d'utiliser la distance de Hausdorff entre objets surfaciques qui tient compte du contour de l'objet et de son intérieur. La figure B.4.10 illustre la différence entre la distance de Hausdorff entre les surfaces et celle entre les contours.

Il ressort très clairement, d'après la figure B.4.9, que la distance de Hausdorff entre les surfaces est la plus adaptée pour qualifier les écarts entre des groupements d'objets, par rapport à la distance de Hausdorff entre les contours. La distance renvoyée par la figure B.4.9(b) est plus proche de la réalité que celle donnée par la figure B.4.9(a).

L'indice de généralisation tel qu'il était défini par Abbas reste cependant critiquable, au moins pour son appellation. Il existe en effet des cas (figure B.4.10), qui représentent des entités généralisées pour lesquelles cet indice renvoie une information contradictoire.

Pendant de tels exemples sont très rarement rencontrés sur des jeux de données réels, et même si le cas se présente, on essaye d'analyser la valeur de cet indice par l'utilisation d'autres mesures.

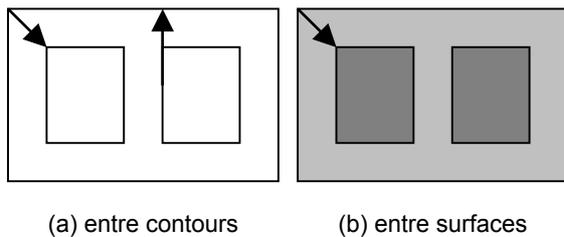


figure B.4.9

Différences entre les Distances de Hausdorff entre contours et surfaces

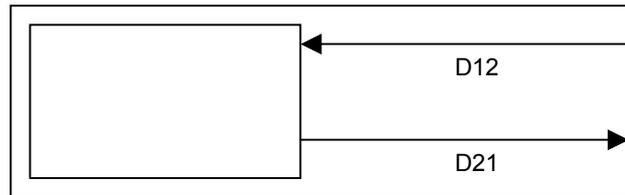


figure B.4.10

D12=D21 ce qui impliquerait un indice de généralisation nul, ce qui n'est pas conforme à la réalité.

Distance de Fréchet

Une illustration intuitive de la distance de Fréchet est la suivante : un maître et son chien suivent deux chemins. Ils avancent ou s'arrêtent à volonté, indépendamment l'un de l'autre, mais ils ne peuvent pas revenir sur leurs pas. La distance de Fréchet entre ces deux chemins est la longueur minimale de la laisse qui permet de réaliser une progression (cheminement) de concert satisfaisant ces conditions.

La distance de Fréchet est une distance maximale entre deux lignes orientées. Elle s'appuie sur la propriété suivante : toute polygline orientée est équivalente à une application continue $f : [a, b] \rightarrow V$ ou $a, b \in \mathbb{R}$, $a < b$ et V est l'espace vectoriel.

La distance de Fréchet (d_F) est la suivante :

soit $f : [a, a'] \rightarrow V$ et $g : [b, b'] \rightarrow V$, deux polyglines et $\| \cdot \|$ la norme usuelle,

$$d_F(f, g) = \inf_{\alpha : [0, 1] \rightarrow [a, a']} \max_{\beta : [0, 1] \rightarrow [b, b']} \left\| f(\alpha(t)) - g(\beta(t)) \right\| \quad (12)$$

La distance de Fréchet a l'avantage de calculer la distance uniquement sur des couples de points qui auraient pu être mis en correspondance visuellement (points homologues) La distance de Fréchet est donc très proche d'une distance maximum "visuelle" entre deux lignes. Hélas, cette distance a l'inconvénient d'être complexe à programmer. Un algorithme d'ordre $O(N M \log^2(N M))$, avec N et M , le nombre de segments des polyglines est donné dans [ALT 95].

Il serait donc nécessaire de définir une distance maximale, simple permettant de mesurer l'écart maximal entre deux lignes en tenant compte de l'ordre des points des lignes. Une variante de cette distance appelée distance de Fréchet discrète est proposée par Devogele [DEVOGELE 00].

Distance entre les fonctions angulaires (modèle angulaire)

La distance utilisée pour comparer les formes des entités surfaciques, en se basant sur leurs fonctions angulaires, repose sur la métrique L_2 dans l'espace des fonctions angulaires. Cette métrique est définie de la façon suivante :

Soient A et B, deux polygones et $\theta_A(s)$ et $\theta_B(s)$ leurs fonctions angulaires respectives. Le degré de similarité entre les deux polygones A et B peut être mesuré par une métrique L_2 entre les deux fonctions $\theta_A(s)$ et $\theta_B(s)$. La distance L_2 entre les fonctions $\theta_A(s)$ et $\theta_B(s)$ est définie par :

$$\delta_2(A, B) = \|\theta_A - \theta_B\|_2 = \left(\int_0^1 |\theta_A(s) - \theta_B(s)|^2 ds \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec } \|\cdot\|_2 \text{ désigne la norme } L_2. \quad (13)$$

δ_2 présente quelques propriétés indésirables telle que la sensibilité à la rotation de l'un des polygones A ou B. Le choix du point origine des mesures influe également sur le résultat de la métrique. Donc, pour éviter ces effets, on définit une autre métrique robuste à ces transformations.

On suppose que le point origine des mesures est décalé d'une quantité t , le long du contour du polygone A, et on suppose également que le polygone A a subi une transformation par rotation d'une quantité θ , ce qui se traduit par la définition d'une nouvelle fonction angulaire pour le polygone A : $\theta_A(s+t) + \theta$. La nouvelle métrique est calculée de manière à trouver la valeur minimale pour l'ensemble des transformations de paramètres t et θ .

La nouvelle métrique est définie comme suit :

$$d_2(A, B) = \min_{\theta \in \mathbb{R}^+, t \in [0,1]} \left(\int_0^1 |\theta_A(s+t) - \theta_B(s)|^2 ds \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Distance entre les signatures polygonales

Pour mesurer les différences entre les signatures des polygones, on propose une norme L_2 qui s'inspire fortement de la distance définie entre les fonctions angulaires.

Étant donné que les signatures des polygones sont sensibles aux transformations par homothétie, l'indicateur doit minimiser cet effet indésirable, et donc la définition de cet indicateur sera la suivante [BEL HADJ ALI 00] :

$$d_2(A, B) = \min_{k \in \mathbb{R}^+, t \in [0,1]} \left(\int_0^1 |k_{AB} \cdot S_A(s+t) - S_B(s)|^2 ds \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

avec k_{AB} est le facteur d'homothétie isotrope.

Il est signalé que cette distance n'est applicable que si le contour de l'entité est normalisé. Par ailleurs, si la modélisation par les signatures considère le contour dans sa dimension réelle, d'autres mesures peuvent être définies.

On peut, par exemple, calculer les moments unidimensionnels des signatures des polygones à contrôler et établir une distance euclidienne entre leurs moments respectifs (pour plus de détails sur cette technique, voir [MERTZIOS 91], ou encore [NEAGO 92]).

Distance surfacique

La distance surfacique utilisée est définie comme suit [VAUGLIN 97].

Soient A et B, deux polygones pour lesquels l'adhérence de l'intérieur est égale aux objets eux-mêmes. Soit $S(A)$, la mesure de l'aire de l'objet A et $S(B)$ celle de l'objet B. On note Δ la différence symétrique.

On rappelle que $A \Delta B = A \setminus B + B \setminus A$, où $A \setminus B$ est le complémentaire de B dans A.

On pose alors :

$$ds_{11}(A, B) = \frac{S(A \Delta B)}{S(A \cup B)} \quad (16)$$

- $ds_{11} = 1 \Rightarrow S(A \Delta B) = S(A \cup B) \Rightarrow S(A \cap B) = 0 \Rightarrow$ les deux objets A et B sont disjoints,
- $ds_{11} = 0 \Rightarrow S(A \Delta B) = 0 \Rightarrow S(A \cup B) = S(A \cap B)$. Cela signifie que les deux objets A et B sont égaux (cas très rare).

Il est à remarquer aussi que d_{s11} peut s'écrire sous la forme suivante :

$$d_{s11}(A,B) = 1 - \frac{S(A \cap B)}{S(A \cup B)} \quad (17)$$

Notons enfin que d_{s11} ne dépend que de la taille et de la position relative des objets mesurés. Elle est indépendante de leur taille absolue, c'est-à-dire, que la distance surfacique est indépendante de l'échelle, et prend ses valeurs sur l'intervalle $[0,1]$.

Dans le cas d'une configuration d'appariement de type 1:n ($\{B\} \rightarrow \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$), la distance surfacique est définie de la manière suivante [BEL HADJ ALI 97] :

$$d_{s1n} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n S(A_i \cap B)}{S(\bigcup_{i=1}^n A_i \cup B)} \quad (18)$$

Il est à noter aussi, que d_{s11} est une distance au sens mathématique. Cette propriété montre l'essentiel de son intérêt sur les objets géographiques.

Autres distances

Les métriques concernant les modélisations par les moments, le lissage gaussien et les descripteurs de Fourier sont en cours de test, et ne sont pas encore validées. À cet effet, dans la suite de l'article, nous ne présentons que les mesures dont les métriques ont été validées telles que la distance de Hausdorff, la distance surfacique et la distance entre fonctions angulaires.

Application : qualification des liens d'appariement

Objectif

L'objectif de cette application est de fournir les informations nécessaires sur la qualité des liens d'appariement à toute application se situant en aval et utilisant le processus d'appariement. Elle peut servir pour les opérations de contrôle qualité des données géographiques, et ce, en accordant des taux de confiance aux entités contrôlées selon la qualité de leurs liens d'appariement.

Elle peut servir également pour les opérations de mise à jour des données géographiques notamment pour la phase de propagation, c'est-à-dire, la décision de propager la mise à jour et la façon de le faire, seront conditionnées par la qualité du lien d'appariement.

La qualification des liens d'appariement est donc une application généraliste dont les résultats peuvent servir à faciliter et à interpréter les applications qui utilisent le processus d'appariement des données géographiques.

Cette application a été menée sur un jeu de données composé de deux couches de polygones représentant les bâtiments dans le Cadastre et la BD Topo sur une zone pavillonnaire située à l'ouest de la ville de Lyon. Ce jeu est constitué de quatre cent trente neuf couples d'entités appariées.

Brève analyse des mesures

Pour mesurer les différences entre les entités appariées, on n'a utilisé que les métriques déjà validées, à savoir:

- distance surfacique,
- distance de Hausdorff,
- distance entre fonctions angulaires.

Les mesures effectuées sont illustrées par la figure B.4.11.

En analysant ces mesures, on constate que l'utilisation d'une seule mesure est loin d'être pertinente pour en dégager une décision concernant la qualité du lien d'appariement.

À titre d'exemple, on peut rencontrer les couples appariés dont la valeur de leur distance surfacique est faible ($\sim 0,2$) et dont leur distance de Hausdorff avoisine les dix mètres (exemple du point encerclé en figure B.4.11). Par conséquent, si on se base que sur la distance surfacique le lien d'appariement sera considéré comme un lien de bonne qualité bien que la distance de Hausdorff qui lui correspond dépasse le seuil toléré.

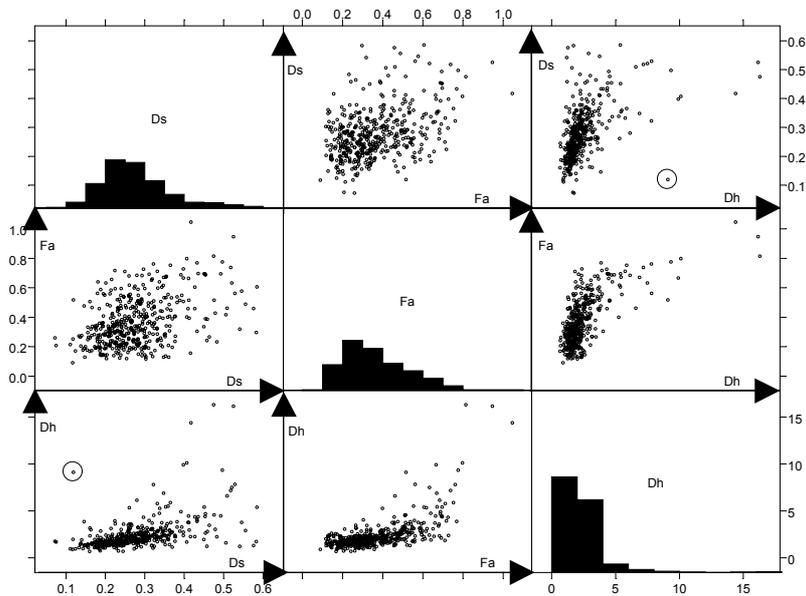


figure B.4.11 : Histogrammes (sur la diagonale) et position des appariements dans l'espace des 3 mesures : distance surfacique, distance entre fonctions angulaires et distance de Hausdorff

Il ressort également de l'analyse des mesures qu'il se trouve que certaines mesures sont corrélées entre-elles. Les questions se posent de laisser tomber une mesure au détriment d'une autre, vu le degré de corrélation, ou de les combiner entre elles pour avoir de meilleures représentations de certaines caractéristiques possibles.

D'après le tableau B.4.2, ci-dessous les mesures les plus corrélées entre-elles sont la distance de Hausdorff et la distance entre les fonctions angulaires, ce qui confirme encore une fois que la distance de Hausdorff rend compte plus de la forme que de la position. Cependant, il existe des cas où l'une des deux mesures est pertinente alors que l'autre ne l'est pas. La différence entre ces deux mesures réside dans le comportement de chacune face au bruit : face à un bruit de faible amplitude, la distance entre les fonctions angulaires est plus discriminante que la distance de Hausdorff.

tableau B.4.2

	Ds	Fa	Dh
Ds	1	0,42	0,50
Tf		1	0,66
Dh			1

Analyser ces mesures d'une manière visuelle paraît très difficile. Donc nous avons essayé de classer ces mesures d'une manière intuitive (§ chapitre suivant) avant de faire appel aux techniques de l'analyse de données, à savoir l'analyse en composantes principales et les techniques de classification.

Approche intuitive

On présente dans ce paragraphe une approche de classification qu'on appelle intuitive en se basant sur la fixation des seuils, *a priori*, d'acceptation (ou de rejet) sur les valeurs des mesures. Les valeurs des seuils sont fixées d'une manière empirique fondée sur une connaissance *a priori* des métriques.

Seuils

Dans le cadre de cette étude, la qualification des liens d'appariement est faite à partir de l'utilisation de trois mesures: la distance surfacique, la distance de Hausdorff et la distance entre les fonctions angulaires. Pour ces trois mesures il va donc falloir fixer les seuils d'acceptation *a priori*.

Distance surfacique

D'après la définition de la distance surfacique, on peut dire que cette mesure exprime, schématiquement, un taux d'inclusion absolu entre deux entités surfaciques, c'est-à-dire, à titre d'exemple si la distance surfacique entre deux objets est de 0,2, cela signifie qu'il existe 80% de la surface des deux objets réunis qui est commune entre eux.

Cependant on peut fixer un seuil sur les valeurs de cette distance, on n'admettant que les couples d'objets qui ont une valeur de D_s qui est inférieure ou égale à 0,4 (60% d'inclusion).

Donc, la valeur du seuil pour les valeurs de la distance surfacique, sera de :

$$SD_s = 0,4.$$

Distance de Hausdorff

Étant donné les différences entre les spécifications de la BD Topo et du Cadastre, notamment en matière de saisie (dans la cadastre, les limites des bâtiments sont saisies à partir de l'emprise au sol, par contre, dans la BD Topo, les bâtiments sont saisis à travers les limites de leurs toits, on a opté pour le choix d'une valeur de seuil qui dépasse légèrement la valeur de l'erreur planimétrique de la BD Topo. La valeur de ce seuil est alors fixée à 2,5 mètres. La valeur du seuil sur les valeurs de la distance de Hausdorff est la suivante :

$$SD_h = 2,5 \text{ m.}$$

Distance entre fonctions angulaires

Le choix du seuil sur les valeurs de la distance entre les fonctions angulaires est également empirique. Cependant en se référant aux travaux de Arkin [ARKIN 91] pour l'utilisation de cette distance pour la reconnaissance des formes et [BEL HADJ ALI 97] pour qualifier les formes des entités géographiques surfaciques, la valeur 0,5 apparaît comme une bonne limite entre l'acceptation et le rejet. La valeur du seuil pour les fonctions angulaires est la suivante :

$$SF_a = 0,5.$$

Comme on l'a mentionné plus haut (§ chapitre "Brève analyse des mesures" et figure B.4.11) les trois règles précédemment définies ne doivent pas être utilisées séparément pour classer les couples appariés. Donc une utilisation combinée s'impose. Ayant utilisé trois mesures et avec la fixation d'un seuil binaire sur chacune d'entre elles, on aboutit à la définition de huit classes (2^3 possibilités), qu'on essaie d'analyser par la suite. Pour aboutir à ces huit classes nous utilisons un arbre de décision que nous schématisons comme suit :

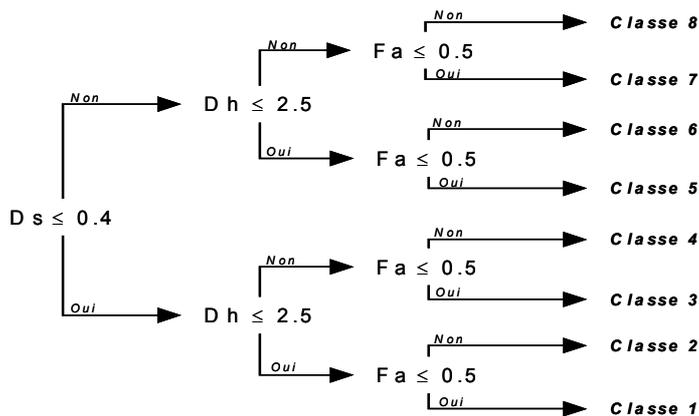


figure B.4.12 : arbre de décision intuitive

Analyse et discussions

D'après l'arbre de décision (figure B.4.12), il est clair que les classes 1 et 8 ne nécessitent aucune discussion. La classe 1 regroupe tous les couples dont les mesures sont toutes inférieures aux seuils et par la suite ces couples peuvent être considérés comme bien appariés en position et en forme.

Par ailleurs, la classe 8 regroupe tous les couples dont les mesures excèdent les seuils tolérés, et donc elle représente la classe des couples mal appariés en position et en forme.

Cependant les classes intermédiaires (2.7) restent sujettes à discussion pour déterminer la typologie d'appariement des couples qu'elles contiennent.

Le cas où la distance surfacique excède le seuil d'acceptation peut induire deux conclusions : 1- soit les deux objets sont décalés dans l'espace soit 2- l'un est inclus dans l'autre. Mais, on ne peut connaître l'amplitude de ce décalage ou cette homothétie qu'à travers l'utilisation de la distance de Hausdorff : si les valeurs de D_h sont supérieures au seuil les objets présentent un fort décalage ou une forte homothétie entre eux, sinon ces transformations peuvent être considérées comme de faible amplitude.

Les valeurs de la distance sur les fonctions angulaires indiquent cependant si les deux objets ont la même forme ou pas. La classe 7, par exemple, regroupe tous les couples qui présentent un fort décalage ou une forte homothétie entre les objets et dont les formes sont très semblables. L'exemple de la figure B.4.13 en illustre un exemple type.

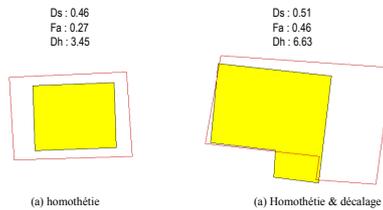


figure B.4.13 : exemples de couples de la classe 7 de l'arbre figure B.4.12

Par ailleurs, si la distance surfacique est inférieure à la valeur du seuil fixé, les deux objets occupent en totalité ou en partie le même espace géographique. L'analyse des valeurs de la distance de Hausdorff permet alors de savoir si l'occupation de la position est parfaite ou est partielle, si Dh est inférieure au seuil l'occupation de l'espace pourrait être perçue comme parfaite, sinon l'occupation est partielle et la décision dans ce cas se fait par l'analyse des valeurs de la distance sur les fonctions angulaires.

Si la valeur de la distance sur les Fa dépasse le seuil, on se trouve dans le cas où les objets présentent des parties parfaitement positionnées mais avec l'existence d'un détail sur l'un des objets qui ne se trouve pas sur l'autre (extension d'un bâtiment, par exemple). Si la distance entre les Fa est inférieure au seuil on se retrouve dans le cas d'une homothétie ou un décalage de faible amplitude avec exactitude de forme. Le tableau B.4.3 illustre le nombre d'objets par classe.

tableau B.4.3

Classe	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre d'objets	292	21	39	48	9	1	10	19

Cependant cette méthode de classification reste très critiquable du fait qu'il est très difficile de définir des seuils sur les valeurs des mesures d'une façon binaire. D'une part, le problème se pose au niveau des frontières des classes qui rend difficile la façon de décider de l'appartenance d'un couple apparié à une classe donnée, et, d'autre part, au niveau de l'attribution d'une signification physique à une classe donnée. L'exemple ci après illustre le problème qui se pose au niveau des frontières des classes.

Soient les deux couples appariés représentés par les triplets de mesures (Ds,Dh,Fa) suivants :

- triplet 1 : (0,40, 2,7, 0,6),
- triplet 2 : (0,41, 2,7, 0,6).

D'après l'arbre de classification qu'on vient de proposer le couple 1 sera classé dans la classe 4 et le couple 2 sera classé dans la classe 8, bien que leurs mesures respectives soient presque les mêmes.

Ces limitations nous ont poussé à faire appel aux techniques d'analyse de données telles que l'analyse en composantes principales et les techniques de classification. Cependant une analyse visuelle des jeux de données nous a permis de fixer *a priori* trois classes de liens d'appariement, que nous allons essayer de les retrouver par les techniques de classification ci-après détaillées et d'en dégager des règles de décision qui permettent de les trouver.

Ces trois classes peuvent être interprétées comme suit :

- classe 1 : couples occupant *relativement* la même position dans l'espace géographique avec une *forte dégénérescence* de forme (actualité, mise à jour),
- classe 2 : couples occupant *presque* la même position dans l'espace géographique avec une soit une *modification* de forme (Généralisation) soit un décalage non négligeable de position,
- classe 3 : couples occupant la *même* position dans l'espace géographique avec une *forme similaire* voire *très légèrement généralisée*.

Classification autour des mesures représentatives

La classification autour des mesures représentatives est une technique de classification non supervisée, et qui consiste à définir *a priori* un nombre de classes dans lesquelles seront regroupées les mesures.

Admettons qu'on souhaite classer les mesures dans k classes, On affecte un triplet de mesures (Ds,Fa,Dh) qu'on estime représentatif à chaque classe. On construit une matrice de dissimilarité entre les triplets de mesures qui se base sur la distance euclidienne.

La matrice a la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 & & & \\ d(2,1) & 0 & & \\ \dots & \dots & \ddots & \\ d(n,1) & d(n,2) & \dots & 0 \end{bmatrix} \text{ avec } d(i,j) = \sqrt{(Ds_i - Ds_j)^2 + (Fa_i - Fa_j)^2 + (Dh_i - Dh_j)^2}$$

Chaque triplet de mesures est affecté dans la classe qui lui est proche. En d'autres termes, soit le triplet de mesures i , soit la classe c_i dont le triplet représentatif est m_{c_i} , soit m_c les triplets représentatifs des autres classes, on affecte i à la classe c_i , si et seulement si :

$$d(i, m_{c_i}) \leq d(i, m_c), \text{ pour tout } c = 1, \dots, k.$$

Au départ les triplets représentatifs sont choisis au hasard, mais qui seront remplacés au cours de processus d'une manière itérative en les interchangeant par d'autres triplets représentatifs et ce en minimisant la fonction suivante :

$$\sum_{i=1}^n d(i, m_{c_i}).$$

Dans le cadre de cette application, nous avons décidé de classer les mesures en trois classes. La table suivante illustre les résultats de cette classification.

tableau B.4.4

Classe	Triplet représentatif (Ds,Fa,Dh)	Nombre d'objets
C1	(0,34, 0,64, 4,75)	50
C2	(0,25, 0,29, 2,36)	166
C3	(0,21, 0,34, 1,59)	223

Le résultat graphique de la classification est illustré par la figure B.4.14 (le résultat de la classification est représenté dans le système d'axe (ds,fa,dh)).

La classification a été opérée sur les mesures telle qu'elles sont (sans aucune normalisation), or, l'échelle des valeurs de la distance de Hausdorff est plus grande que celles de la distance surfacique et de la distance entre fonctions angulaires (qui présentent presque la même échelle de mesure), ce qui rend les valeurs la distance de Hausdorff très prépondérantes par rapport aux autres mesures et par la suite la classification sera fortement influencée par la distance de Hausdorff.

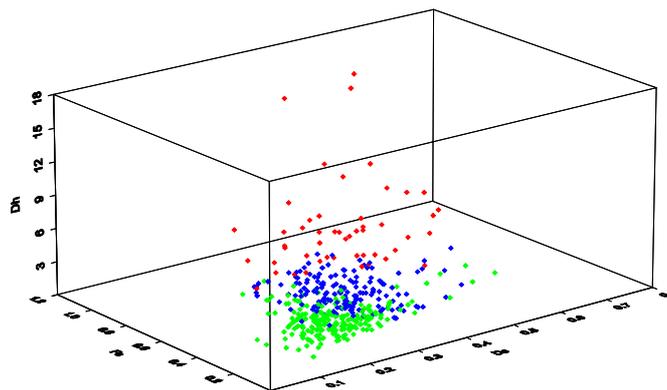


figure B.4.14 : classifications des mesures autour des triplets représentatifs

Les règles que nous avons dégagées de cette classification prouvent très bien ce que nous venons d'avancer sur l'influence de la distance de Hausdorff, puisque ces règles ne se basent que sur les valeurs de la dite distance pour établir la typologie des liens.

Les règles dégagées sont les suivantes :

tableau B.4.5

Si	(Dh > 3,5m)	alors	Classe 1
Si	(2m < Dh ≤ 3,5m)	alors	Classe 2
Si	(Dh ≤ 2m)	alors	Classe 3

Le pourcentage d'erreur entre la classification par ces règles et la classification à partir de laquelle elles sont extraites est de 0,45%. Malgré la prépondérance de la distance de Hausdorff sur les autres mesures et la non utilisation de ces dernières dans l'établissement des règles de décision, nous remarquons que les valeurs des seuils approchent la réalité, c'est-à-dire, la troisième classe qui est sensé contenir les couples dont les liens d'appariement sont acceptables ont une distance de Hausdorff inférieure à deux mètres (valeur qui approche l'erreur planimétrique de la BD Topo).

La même technique de classification a été appliquée sur les mêmes mesures mais en les normalisant. La classification semble plus discriminante notamment au niveau des frontières des classes. La répartition des couples

dans l'espace (Ds, Fa, Dh) est donnée par la figure B.4.15, ci-dessous. Des règles de décision concernant cette classification ont été dégagées, qui en les appliquant aux mesures aboutissent au même résultat que la classification avec un taux d'erreur de 3% (confusion entre les règles et la classification à partir de laquelle elles ont été dégagées). Ces règles sont illustrées par la figure B.4.16. Dans le but de consolider ces règles de décision, on a essayé une autre technique d'analyse de données, en l'occurrence une analyse en composantes principales et une classification sur les plans principaux.

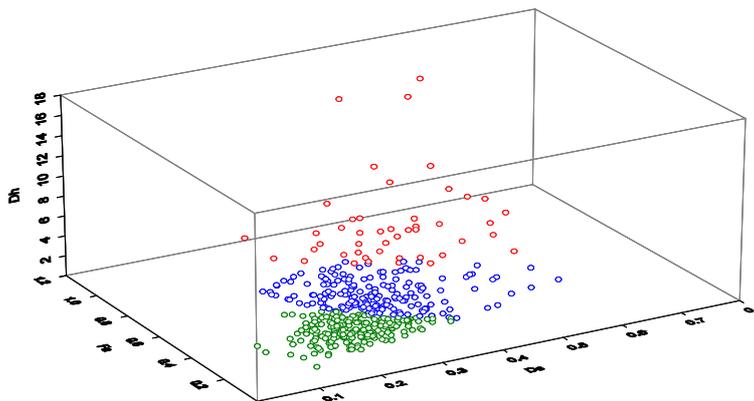


figure B.4.15 : classification des mesures normalisées

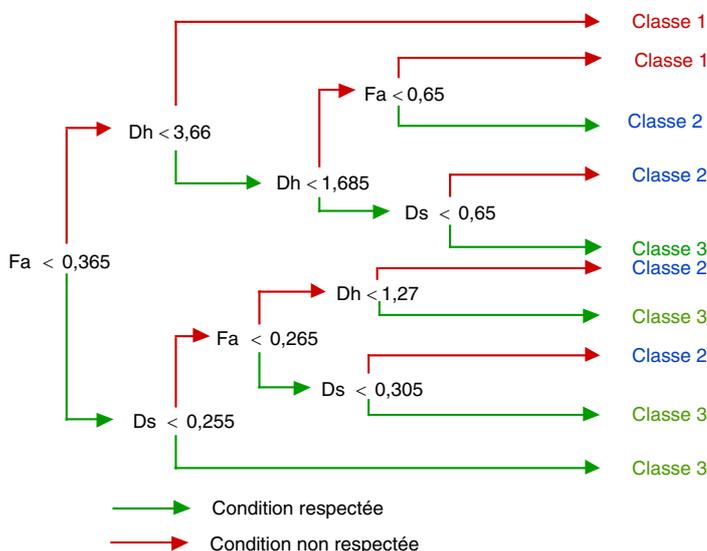


figure B.4.16 : règles de décision (classification autour des valeurs représentatives normalisées)

Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique essentiellement descriptive qui a pour objectif premier de représenter, sous forme de graphique, le maximum de l'information contenue dans le tableau de mesures. Donc, on utilise les techniques de l'analyse en composantes principales pour choisir entre les mesures, et afin d'aboutir à une sélection des plus pertinentes d'entre-elles dans le but d'alléger le nombre de mesures à utiliser par la suite. En d'autres termes, on utilise l'analyse en composantes principales pour savoir :

- comment se structurent les mesures : quelles sont celles qui sont associées? Quelles sont celles qui ne le sont pas? Quelles sont celles qui " vont dans le même sens " ?
- et/ou comment se répartissent les couples ? Quels sont ceux qui se ressemblent (en terme de mesures) ? Quels sont ceux qui sont dissemblables ?

L'analyse en composantes principales consiste à transformer les mesures initialement obtenues et qui sont corrélées entre elles en des nouveaux indices synthétiques qui sont complètement décorrélés et qui sont obtenus par une combinaison linéaire des mesures initiales. Parmi tous les indices possibles, l'ACP recherche d'abord celui qui permet de voir au mieux les individus, c'est-à-dire, celui pour lequel la variance des individus est maximale. Cet indice est appelé première composante principale ou encore premier axe principal. Une certaine proportion de la variation totale des individus est expliquée par cette composante principale.

Ensuite, une deuxième composante est ceci sous deux conditions :

- avoir une corrélation nulle avec la première,
- avoir à son tour la plus grande variance.

Le processus se déroule jusqu'à l'obtention du première et dernière composante principale.

Tests et résultats

Comme on l'a mentionné plus haut, toutes les mesures utilisées sont complémentaires et doivent être utilisée d'une manière combinée pour aboutir à des règles de décision robustes concernant la validation des liens d'appariement et le contrôle de la qualité de forme et de position des entités surfaciques. Donc, pour dégager la pertinence d'une mesure et la décision concernant son utilisation, c'est-à-dire, "est-ce que cette mesure apporte sa part d'information en la combinant avec les autres ou non"? On a utilisé la technique de l'analyse en composantes principales que nous avons décrite plus haut. Il ressort de cette analyse que toutes les mesures contribuent, presque, à part égale, dans la première composante principale qui est porteuse de la majeure partie de l'information (~70%) et qui présente la plus grande variabilité (figure B.4.17). Le même comportement est constaté pour tous les jeux de données testés :

- deux saisies BD Topo sur la même zone l'une, à partir des photographies aériennes et l'autre, à partir des images de la caméra numérique sur la ville de Montluçon,
- deux saisies de la BD Topo à deux dates différentes (1994 et 1996) sur la ville d'Angers.

La figure B.4.18 représente la répartition des couples mesurés sur le premier plan principal. En analysant la répartition des mesures sur le premier plan principal, il ressort que les couples qui sont proches dans ce repère représentent la même typologie de liens d'appariement. L'exemple des couples 1,181 et 254, représentés au centre à droite du graphe présentent une typologie particulière du fait que toutes les mesures qui leur correspondent excèdent les limites tolérables, et qui sont également très éloignées par rapport aux autres mesures des autres couples. Ces couples d'objets sont illustrés par la figure B.4.19.

Par ailleurs, il apparaît sur la figure B.4.18, que la distance de Hausdorff et la distance entre les fonctions angulaires vont dans le même sens, ce qui confirme la constatation relevée lors de l'analyse des valeurs de corrélations entre les mesures. La forte concentration des mesures autour de l'origine donne, *a priori*, une forte indication sur une bonne qualité globale des liens d'appariement.

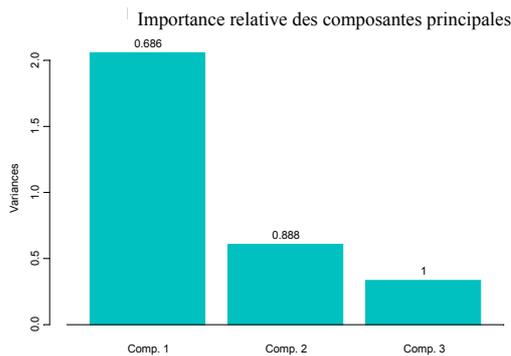


figure B.4.17

Part d'information portée pour chaque composante principale.

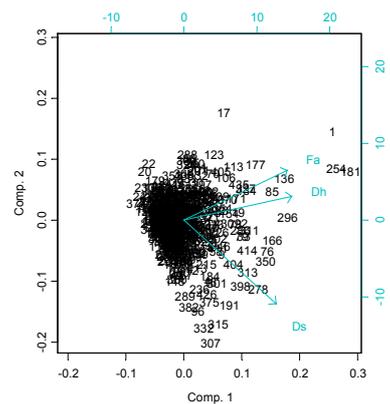


figure B.4.18

Répartition des mesures sur le premier plan principal.

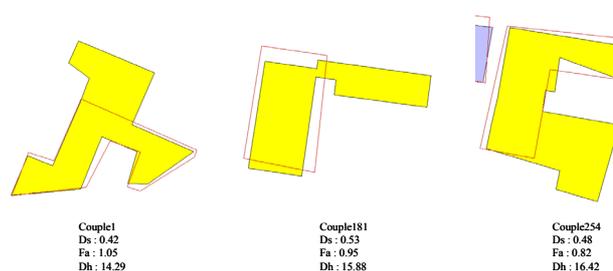


figure B.4.19 : quelques exemples

L'analyse en composantes principales nous a permis de comprendre le comportement des mesures, ainsi que leur répartition dans un cadre global. Cependant l'idée de cette étude est de dégager une typologie de liens en se basant sur ces mesures. À cet effet, nous avons essayé d'employer les techniques de classification pour en dégager des classes de mesures.

La classification est réalisée en utilisant les deux premières composantes principales car elles sont porteuses d'à peu près de 90% de l'information initiale des valeurs des mesures (cf. figure B.4.17).

La méthode de classification utilisée consiste à subdiviser l'ensemble des mesures d'une manière hiérarchique en créant des agglomérats de mesures jusqu'à l'aboutissement à des classes ne contenant qu'un seul triplet de mesures, pour en savoir plus sur cette technique de classification [CHAVENT 92). La figure B.4.20 illustre le résultat de cette classification.

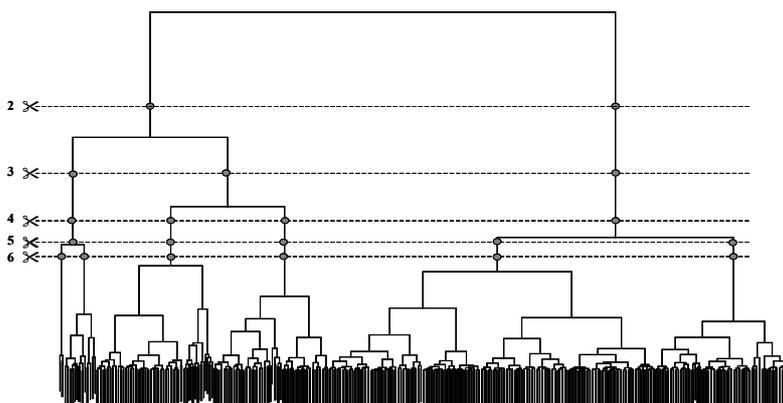


figure B.4.20 : classification hiérarchique sur le premier plan principal

D'après cette classification, on peut distinguer deux grandes classes de valeurs de mesures. Cependant le nombre de classes est déterminé par le choix du seuil de coupure sur l'arbre de classification, On a choisi un seuil de coupure de façon à pouvoir retrouver les trois classes déjà analysées par la classification précédente.

Par ailleurs, rien n'empêche de choisir d'autres seuils de coupure afin d'affiner la classification et ce en divisant une classe en deux ou plus. La figure B.4.21 illustre la répartition de ces quatre classes dans le système d'axes (ds,fa,dh).

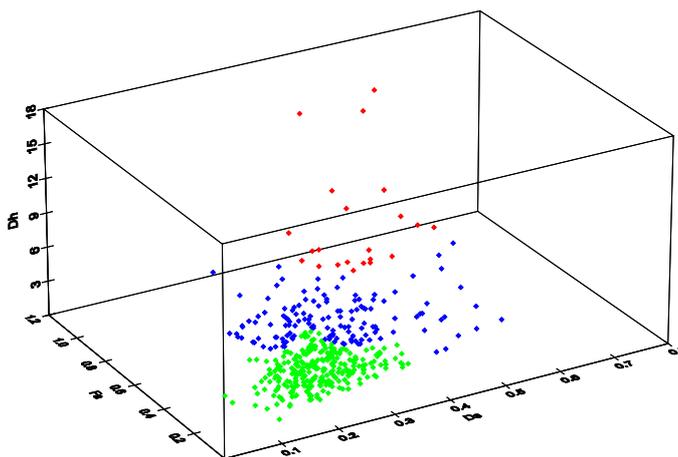


figure B.4.21: classification des couples par la méthode hiérarchique

La typologie des liens d'appariement obtenus par cette technique de classification est la même que celle obtenue par la classification précédente sur les valeurs des mesures normalisées. Cependant, il se trouve qu'il existe des liens d'appariement qui ont passé d'une classe à une autre selon la technique de classification, ceci est du en quelque sorte au pouvoir discriminatoire des mesures notamment au niveau des frontières des classes.

À partir de cette classification, nous avons extrait des règles de décision sur les valeurs des mesures, qui en les appliquant aboutissent au même résultat de la classification avec un taux d'erreur de 5%.

Ces règles se présentent sous la forme suivante :

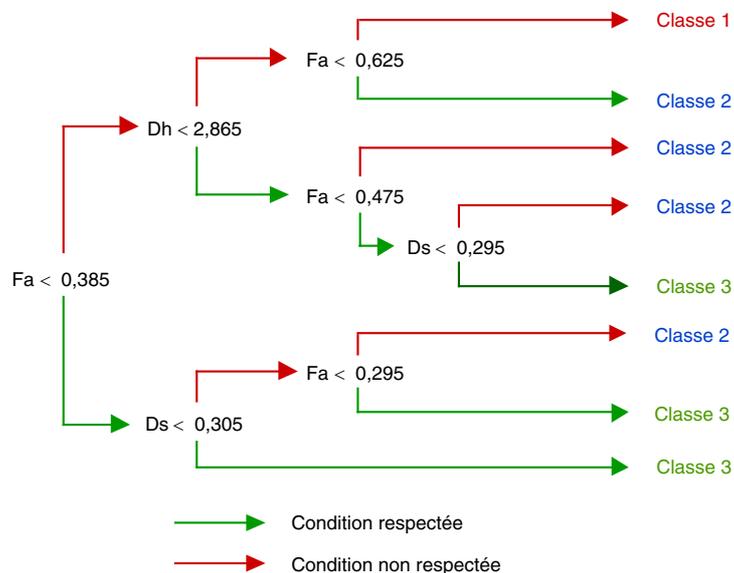


figure B.4.22 : arbre de décision issue à partir de la classification hiérarchique

Analyse des classifications

Dans cette section, on tente d'analyser et de comparer les deux classifications utilisées, à savoir la classification autour des couples représentatifs et la classification sur le premier plan principal.

La première réflexion consiste à voir si les couples appariés sont bien classés par les deux méthodes.

Pour définir le terme " bien classé ", on rappelle d'abord la définition des trois classes :

- classe 1 : couples occupant *relativement* la même position dans l'espace géographique avec une *forte dégénérescence* de forme du par exemple à un problème d'actualité ou de mise à jour,
- classe 2 : couples occupant *presque* la même position dans l'espace géographique avec une *modification* de forme (Généralisation),
- classe 3 : couples occupant la *même* position dans l'espace géographique avec une *forme similaire* voire très *légèrement modifiée* (suppression d'un détail non significatif).

Donc le terme " bien classé " signifie que le couple d'objets est classé dans la même classe par les deux méthodes de classification précédemment présentées.

À cet effet, on a dressé le tableau suivant (tableau B.4.6) illustrant les nombre des couples d'objets bien classés et le nombre des couples qui changent de classe d'une classification à une autre.

D'après le tableau comparatif B.4.6, ci-dessous, on retrouve 78% des couples appariés (soient trois cent quarante quatre couples sur un total de quatre cent trente neuf) pour lesquels nous pouvons établir une typologie correcte.

Les 22% restants sont les couples qui se trouvent aux frontières des classes et qui sont les couples dont les valeurs des mesures sont peu discriminantes pour les départager d'une manière claire entre les classes.

tableau B.4.6

		Classification sur le premier plan principal		
		C1	C2	C3
Classification autour des couples représentatifs	C1	22	24	
	C2	0	115	71
	C3		0	207

La figure B.4.23 illustre les couples bien classés ainsi que ceux dont l'appartenance à une classe est confuse.

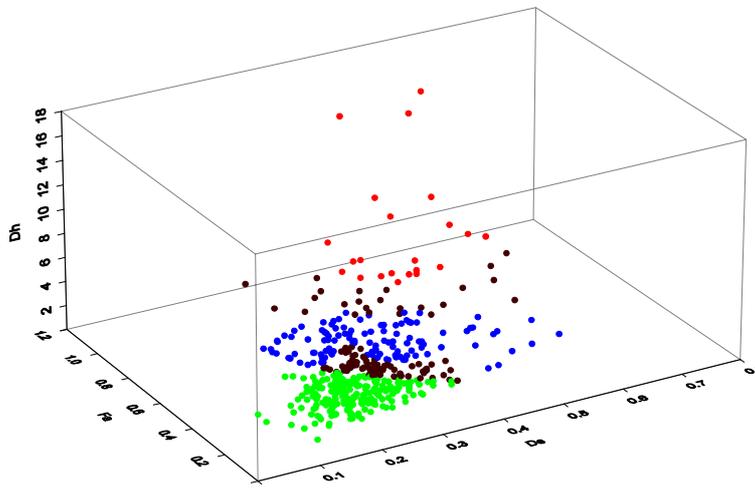


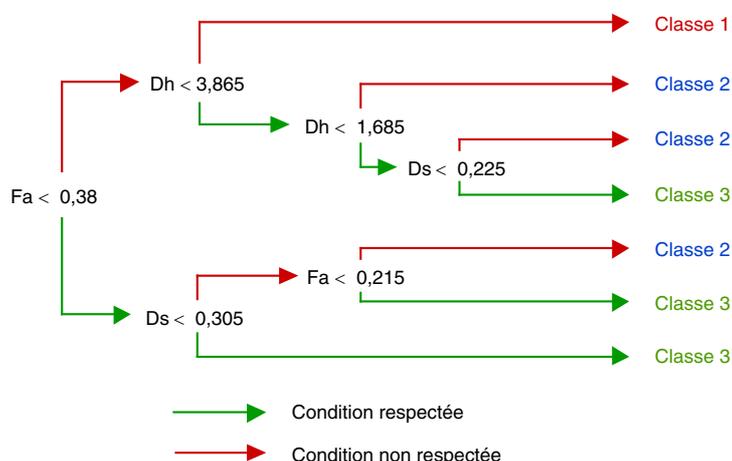
figure B.4.23 : comparaison des deux types de classification

Cependant pour les 78% des couples bien classés, on a essayé d'établir des règles de décision (comme on l'a fait pour chacune des classifications)

Ces règles peuvent être injectées dans le processus d'appariement afin de signaler aux utilisateurs la qualité de leur appariement (objets dans la classe 3 et éventuellement la classe 2) et de les guider vers les liens qui sont dégénérés tels les objets de la classe 1. Ces règles ont été obtenues avec 0,5% d'erreur à partir des couples bien classés. Elles sont illustrées par la figure B.4.24.

En analysant les seuils obtenus pour établir les règles (figure B.4.24) on peut avancer les remarques suivantes :

- *pour la distance de Hausdorff* : on trouve sur l'arbre deux valeurs de seuils (3,865 et 1,685). les valeurs se situant au delà de la première valeur (3,865) renvoient à des liens d'appariement spécifiques évoquant les problèmes de mise à jour ou d'actualité. Par ailleurs, les valeurs de Dh comprises entre les deux valeurs de seuils illustrent des liens d'appariement correctes mais avec une modification de forme ou un décalage de position, et cela est du essentiellement à la nature du jeu de données utilisé (différence des spécifications entre le cadastre et la BD Topo). La deuxième valeur de seuil (1,685) rejoint fortement la valeur de l'emq de la BD Topo, tous les liens dont la valeur de la distance de Hausdorff est inférieure à ce seuil sont considérés comme corrects et en forme et en position,
- *pour la distance entre fonctions angulaires* : selon Arkin [ARKIN et al 91], la valeur 0,5 sur la distance entre les fonctions angulaires est la frontière entre l'acceptation et le rejet (seuil défini pour la reconnaissance des formes). Dans cette application le seuil dégagé sur les valeurs de cette métrique est de 0,38 (~0,4) qui approche le seuil fixé par [ARKIN et al 91], et qui est spécifique pour les entités géographiques notamment en ce qui concerne le thème " bâti ",
- *pour la distance surfacique* : la plus grande valeur de seuil obtenue pour la distance surfacique est de 0,305, ce qui signifie, que si deux entités présentent une distance surfacique inférieure à la valeur de ce seuil, ils ont au moins 70% d'inclusion absolue l'une dans l'autre. cette valeur paraît raisonnable pour pouvoir l'utiliser en tant que frontière entre le rejet et l'acceptation, si la distance surfacique est utilisée d'une manière isolée.



Conclusion

La modélisation des entités surfaciques, telles qu'elles sont stockées et manipulées par les SIG actuels, s'articule essentiellement autour de la notion de point. On a noté dans ce rapport que cette modélisation est très réductrice de la nature des entités surfaciques dans le sens où elle les traite uniquement à travers leurs contours. Or, les contours ne sont porteurs que d'une part de l'information que contient l'entité surfacique. Donc, à côté de l'analyse du contour, il faut ajouter l'analyse de l'intérieur de l'entité. La prise en compte de l'intérieur de l'entité s'avère indispensable surtout dans le cas d'une configuration d'un objet complexe (exemple des polygones à trous ou d'un ensemble de polygones formant un agrégat). À cet effet, on a présenté, dans ce rapport, un ensemble de modélisations des entités surfaciques autres que la modélisation en liste chaînée de coordonnées (x,y,z).

Dans la deuxième partie de ce rapport, on a tenté d'appliquer quelques-unes des mesures pour l'établissement d'une typologie des liens d'appariement entre deux jeux de données représentant respectivement des bâtiments du Cadastre et de la BD Topo. Les mesures utilisées sont la distance surfacique, la distance de Hausdorff et la distance entre les fonctions angulaires.

L'utilisation de plusieurs mesures est fortement recommandée, et cela provient du fait qu'une seule mesure est loin d'être discriminante pour qualifier un lien d'appariement. La méthode utilisée pour établir une typologie des liens consiste à une classification des mesures ainsi réalisées. On a utilisé deux méthodes de classification : une classification des valeurs des deux premiers axes principaux, et une classification autour des objets dont les valeurs des mesures ont été estimées représentatives des classes.

Les couples d'objets ont été classés dans trois classes dont la signification de chacune est donnée dans la fin du paragraphe "Analyse et discussions". Une comparaison entre les deux méthodes de classification a été également réalisée pour détecter les couples d'objets qui ont été classés dans la même classe avec les deux méthodes. Ces couples dit "bien classés" nous ont servi à établir des règles de décision (cf. chapitre "Analyse des classifications") qui, à leur tour, peuvent être injectées dans le processus d'appariement, afin de donner les indications nécessaires concernant la qualité des liens d'appariement.

Par ailleurs, on a constaté que 22% des couples appariés du jeu testé ont changé de classe entre les deux méthodes de classification. Ces couples se trouvent sur les frontières entre les classes voisines ce qui rend leur basculement d'une classe à une autre très facile.

Ceci est la conséquence de deux facteurs essentiels, d'une part la nature du jeu de données utilisé pour les tests, et d'autre part le pouvoir discriminatoire des distances utilisées à départager les couples appariés entre les classes. À cet effet, l'utilisation de mesures autres que celles utilisées pour cette application s'avèrent très nécessaire dans le but de consolider les règles de décision déjà établies.

Références

- [ABBAS 94] I. Abbas : *Bases de données vectorielles et erreur cartographique. Problèmes posés par le contrôle ponctuel; une méthode alternative fondée sur la distance de Hausdorff*, thèse de doctorat de l'université Paris-7, IGN, 1994.
- [ALESHEIKH 99] A. Alesheikh, M.A. Chapman, J.A.R Blais and H. Karimi : *Uncertainty Models of Gis Objects*, in proceeding of the International Symposium on Spatial Data Quality 1999, Eds. W. Shi, M. F. Goodchild and P. F. Fisher, Hong Kong Polytechnic University, pp. 308-315, July 1999.
- [Alt 95] H. Alt & M. Godau : *computing the frechet distance between two polygonal curves*. International journal of computational geometry & applications, Vol. 5, Nos. 1 & 2, 1995, Eds. World Scientific Publishing Company.
- [ARKIN 91] E. Arkin et al : *An Efficiently Computable Metric for Comparing Polygon Shapes*, in IEEE trans. On Pattern Recognition and Machine Intelligence, vol. 13, n° 3, pp. 209-216, 1991.
- [CHAVENT 92] M. Chavent : *Analyse de données symboliques, une méthode divisive de classification*, thèse de doctorat de l'université Paris-9 Dauphine, 161 pages, 1992.
- [CLEMENTINI 97] E. Clementini and P. Di Felice : *A Global Framework for Qualitative Shape Description*, in Geoinformatica, 1.1997, pp. 11-27, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [DEVOGELE 00] Th. Devogele : *Mesure de similitude et processus de fusion à l'aide de la distance de Fréchet discrète*, article soumis à la Revue Internationale de Géomatiques, Hermes (Eds), 2000.
- [FRITSH 98] E. Fritsch : *Recherche d'outils et de représentations pour la généralisation*, rapport de DEA, IGN, École Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 980008/S-STA-EF, 1994.
- [HU 62] M.K. Hu : *Visual Pattern Recognition by Moments Invariants*, IRE Trans. on Information Theory, vol. 8, n° 1, pp. 179-187, 1962.
- [MERTIZIOS 91] B.G. Mertizios and K. D. Tsirikolias : *Fast Shape Discrimination Using One-Dimensional Moments*, in Proceeding of the International Conférence on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'91, vol. 4, pp. 2473-2475, 1991.

- [MOKHTARIAN 92] F. Mokhtarian and A.K.A. Mackworth : *A Theory of Multiscale, Curvature-Based Shape Representation for Planar Curves*, in IEEE Trans. On Pattern analysis and Machine Intelligence, vol. 14, n° 8, pp. 789-805, August 1992.
- [NEAGO 92] V. Neago : *Legendre Descriptors for Classification of Polygonal Closed Curves*, in Proceeding of 11th IAPR International Conference on Pattern Recognition, 1992, vol. II, Conference B : Pattern Recognition Methodology and Systems, pp. 717-720, 1992.
- [REGNAULD 98] N. Regnaud : *Généralisation du bâti : structure spatiale de type graphe et représentation cartographique*, thèse de doctorat de l'Université de Marseille, laboratoire COGIT, IGN-SR 980010/S-THE-NR, mai 1998.
- [TEAGUE 80] M.R. Teague : *Image analysis via the General Theory of moments*, *Applied optics*, vol. 19, n° 8 (1980), pp. 1353-1356, 1980.
- [VAUGLIN 99] F. Vauglin : *A Practical Study on Precision And Resolution in Vector Geographical Databases*, in Proceeding of the International Symposium on Spatial Data Quality 1999 Eds. W. Shi, M. F. Goodchild and P. F. Fisher, Hong Kong Polytechnic University, July 1999, pp. 84-94, laboratoire COGIT, IGN-SR 990010/S-ART, 1999.

Publications

- [BEL HADJ ALI, VAUGLIN 99] Atef Bel Hadj Ali & François Vauglin : *Geometric Matching of Polygons in GISs and assessment of Geometrical Quality of Polygons*, in Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99. Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 33-43, Hong Kong Polytechnic University, laboratoire COGIT, IGN-SR 990012/S-COM, juillet 1999.
- [BEL HADJ ALI, VAUGLIN 00] Atef Bel Hadj Ali & François Vauglin : *Geometric Matching of Polygons in GISs and assessment of Geometrical Quality of Polygons*, article soumis et accepté (*en session poster*) pour Accuracy'2000. Amsterdam (NL), 12-14 juillet 2000, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-006/S-COM-ABHA, 2000.
- [HARVEY et al 98] F. Harvey, F. Vauglin & A. Bel Hadj Ali : *Geometric Matching of Areas : Comparison Measures and Association Links*, in Proceeding of 8th International Symposium on Spatial Data handling, SDH'98, Vancouver (Canada), T.K. Poiker & N. Chrisman (Eds), pp. 557-568, laboratoire COGIT, IGN-SR 980035/S-COM, 1998.
- [VAUGLIN, BEL HADJ ALI 98] F. Vauglin & A. Bel Hadj Ali : *Geometric matching of polygonal surfaces in GISs*. ASPRS-RTI Annual conference, Tampa, FL (USA), pp. 1511-1516, laboratoire COGIT, IGN-SR 980032/S-COM, 1998.

C. Bilan des actions de recherche

C.1 Image et photogrammétrie

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

C.1.1 Correction et modélisation des ombres

Nicolas Paparoditis

Dans le cadre de cette Action de recherche, proposée pour l'année 1999, un certain nombre d'outils ont été réalisés. Ces développements concernent plus particulièrement les aspects de modélisation géométrique.

Le premier de ces outils permet de transformer tous types de modèles 3-D (TRAPU, TIN ou encore MNE) en un modèle générique de surface, sous la forme d'un graphe de faces polygonales. L'intérêt d'une telle modélisation est que les traitements s'appuyant sur les modèles 3-D ne doivent pas être développés à chaque fois pour chaque type de représentation.

Le deuxième permet d'élaborer des cartes d'ombres et d'ombrages mais aussi d'angles solides aussi bien dans la géométrie d'une prise de vue que dans la géométrie d'une ortho-image. Ces données sont essentielles pour estimer les contributions d'éclairément en tout point du paysage afin de pouvoir inverser les modèles radiométriques et corriger radiométriquement les images.

Enfin, un outil interactif de visualisation-temps réel de ces modèles 3-D, particulièrement bien adapté aux volumes de données importants et aux spécificités des modèles, a été mis au point. Entre autres, cet outil permet de simuler des vues perspectives avec différents types de projections (axonométriques ou coniques) avec les ombres et les ombrages correspondants à un éclairément solaire donné.

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

Patrick Julien et Gil Gonçalves

Ce titre regroupe trois thèmes : la qualité des modélisations numériques du relief ; la modélisation mathématique du relief ; des compléments de photogrammétrie. Le premier thème est traité dans le cadre d'une thèse ; le deuxième thème n'a pas été abordé ; le troisième a été abordé superficiellement.

La thèse mentionnée plus loin (de Gil Gonçalves) est achevée et intitulée "Qualités requises en modélisation numérique du relief. Étude de l'équivalence entre modèle cartographique et modèle numérique". Elle démontre qu'on peut améliorer sensiblement les MNT (modèles numériques de terrain) établis à partir de courbes de niveau, en exploitant plus complètement l'information contenue dans ces courbes, notamment en extrayant de ces courbes les lignes de crêtes et de talwegs, et en contraignant le MNT à s'ajuster sur ces lignes.

La thèse propose un système cohérent de pondération des points-échantillons ajustés par le MNT (points de courbes de niveau, de crêtes et talwegs), rendant ce MNT insensible à leurs variations de densité. La thèse montre enfin que certains artefacts propres, à un MNT dérivant de courbes de niveau, peuvent être mis en évidence en considérant la longueur des courbes de niveau tracées sur ce MNT. Ces résultats ont été présentés dans un article pour le "Workshop ISPRS" d'avril 1999 à Paris, paru dans le bulletin SFPT [GONÇAVES et al 99], et dans un article soumis à "ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing".

En ce qui concerne le troisième thème de recherche sur les compléments de photogrammétrie, on a commencé à examiner la possibilité d'un calcul de petits blocs, en minimisant le critère de moindres carrés par relaxation, sans linéarisation ; l'intérêt est de pouvoir introduire facilement des types non-classiques d'observations, avec un effort minimal d'analyse et de programmation.

Publication

[GONÇALVES et al 99] G. Gonçalves, P. Julien, S. Riazanoff & B. Cervelle : *Le problème des courbes intercalaires dans la construction d'un MNT maillé à partir des courbes de niveau*, Colloque SIPT/ISPRS, WGII/6, "Production des données géographiques 3-D vers le respect des contraintes applicatives", Paris (F), 7-9 avril 1999, in Bulletin de la SFPT n° 153 (1999/1), laboratoire MATIS, IGN-SR 990003/C-ART, 1999.

C.1.3 Modèle numérique d'élévation et orthophotographie

Didier Boldo, Grégoire Maillet et Françoise Cherel

Cette année de recherche a permis d'aborder deux types de problèmes complémentaires :

- réalisation d'ortho-images " vraies " à partir d'un MNE et d'images en multi-recouvrements,
- modélisation radiométrique de la caméra numérique et de l'atmosphère.

D'autre part, il a été mis en œuvre :

- la conception d'une plate-forme pour la mise en correspondance d'images aériennes, et la qualité d'un MNE,
- l'amélioration de la fabrication fine d'un MNS et d'ortho-images à l'occasion de La fourniture d'un MNE pour la ville de Rennes

Vraies ortho-images

L'étude a permis de mettre au point un algorithme permettant de calculer une " vraie " ortho-image (avec bâtiments redressés) à partir d'une image aérienne et d'un MNE. Cependant, tous les défauts classiques des MNE (bords de bâtiments irréguliers, fausses corrélations...) se retrouvent dans les ortho-images et créent des artéfacts gênant visuellement.

Tous les points au sol n'étant pas vus depuis un cliché unique, il est nécessaire, afin de créer une image sur une zone déterminée, de fusionner les données provenant des différentes images aériennes.

Le problème de la détermination d'une ligne de raccord entre images a été abordé. Un premier algorithme (issu de Hervé Le Men et Marc Pierrot Deselligny) a été testé avec succès (et est utilisé au projet Ortho de l'IGN) sur les ortho-images classiques. Il ne permet cependant pas de prendre en compte les problèmes spécifiques des vraies ortho-images. En effet, du fait des occlusions, le problème de mosaïquage ne se limite plus à la détermination d'une simple ligne de raccord. Cependant, en déterminant la ligne de raccord au sein des bandes, en comblant les occlusions au sein de la bande, puis en mosaïquant les bandes, on parvient souvent à un résultat acceptable. Cette solution ne donne pas totalement satisfaction, notamment au moment du mosaïquage des bandes.

Deux publications ont été proposées à RFIA'2000 sur ces thèmes.

Modélisation radiométrique

Le problème d'incohérence radiométrique entre les images aériennes est très gênant dans le cas des vraies ortho-images, car il est nécessaire de combler les occlusions d'une image par des données venant d'autres images.

Un modèle d'atmosphère et de caméra a été dérivé à partir de celui développé par H. Le Men pour le satellite SPOT. Le travail actuel porte sur la détermination des paramètres physiques (rendement global de la caméra, visibilité au moment de la prise de vues, albédo moyen du sol) de ces modèles à partir des images. De nombreuses méthodes ont été testées, à partir de points dont on suppose connaître l'albédo, des différences de radiométries d'une même zone depuis différents points de vue, de la variation de radiométrie d'une même surface entre parties ombragées et ensoleillées [GAULUÉ, BOLDO 99].

Les résultats utilisant cette dernière méthode sont encourageants, mais demandent un approfondissement à la fois théorique (justification de la méthode) et pratique (application à d'autres chantiers).

Conception d'une plate-forme pour la mise en correspondance d'images aériennes, qualité d'un MNE

Les algorithmes de corrélation, de segmentation et de classification sol/sursol ont été repris et passés en C++ (Noyau) utilisable sur PC (Windows NT et Microsoft® ou Linux).

Il reste à adapter le corrélateur pour les images numériques et à récupérer la classification bâtiment/végétation.

Une première version de la plate-forme a été écrite : elle permet de lancer une corrélation de type Caroline Baillard sur un couple d'épipoles, de lancer des passages d'images de disparités en MNE et de faire des fusions simples de MNE. La plate-forme contient également un éditeur de MNE (développé en Java par Thomas Guenais au cours d'un stage) permettant de les visualiser et de faire des corrections simples (affectation d'une altitude à une zone) avec ou sans l'utilisation d'une vue de référence (ortho-image, par exemple).

Il reste :

- à ajouter une gestion de chantier simple (sélection des images utiles à partir d'une zone de travail),
- à intégrer d'autres corrélateurs (notamment celui de Nicolas Paparoditis),
- à ajouter des outils de comparaison et d'évaluation de MNE (en reprenant les travaux de Laurent Baey, par exemple),
- à développer les corrections interactives.

En ce qui concerne l'évaluation de la qualité, le stage de Laurent Baey fournit des bases pour la comparaison d'un MNT et d'un MNE, mais tout reste à faire.

Fabrication fine d'un MNS et d'ortho-images

Dans le cadre de la production du MNE pour la ville de Rennes, quelques nouveautés ont été apportées au processus habituel de fabrication de MNE.

- L'utilisation de la BDZ et d'une corrélation sur des images sous-échantillonnées pour le paramétrage automatique de la corrélation.
- La fusion à l'aide d'une médiane basse dans les zones de recouvrement de MNE.
- La densification d'un MNE à l'aide d'une BdZ (zones homogènes, parties cachées).
- L'utilisation d'un MNT de référence (type BdZ) pour l'amélioration de la classification sol/sursol dans les cas des sursols étendus et des sols inclinés, a été abordée sous forme d'un stage (Laurent Baey-Comparaison de MNE avec un MNT de moindre précision pour l'extraction de zones de sursol étendues).

La fourniture d'un MNE pour la ville de Rennes

La production d'un MNE sur une zone de 100 km² avec un pas de 40 cm a mobilisé, au sein de l'équipe, environ deux mois x homme pour la phase de préparation et trois mois x homme pour la phase de production des données.

Cette expérience a permis de préciser les besoins en termes de plate-forme de corrélation et d'outils de correction des MNE. Elle a également permis de mieux cibler les attentes des utilisateurs potentiels de MNE. Nos données ont permis de faire de la réalité virtuelle sur des scènes urbaines, mais leur complexité et leur bruit ont nécessité l'utilisation d'une BD planimétrique et d'une sélection manuelle des altitudes utiles.

Publications

[BOLDO, LE MEN 99] D. Boldo & H. Le Men : *Orthophotographie avec bâtiments redressés*, soumis à RFIA'2000, laboratoire MATIS, IGN-SR 990030/C-COM, 1999.

[GAULUÉ, BOLDO 99] E. Gaulué & D. Boldo : *Obtention de paramètres physiques du sol (réflectance, géométrie) par modélisation physique du signal reçu par la caméra numérique*, note interne du laboratoire MATIS, laboratoire MATIS, IGN-SR 990032/C-RAP, 1999.

[LE MEN, BOLDO 99] H. Le Men & D. Boldo : *Mosaïque automatique d'orthophotographies*, soumis à RFIA'2000, laboratoire MATIS, IGN-SR 990031/C-COM, 1999.

C.1.4 Appariement d'un modèle 3-D de site urbain et de clichés terrestres haute résolution

Jocelyn Marchadier

Contexte

Le sujet initial de notre étude est le recalage d'un modèle 3-D géoréférencé de type TRAPU et d'images terrestres de résolution décimétrique et sa mise à jour, pour obtenir un modèle texturé photoréaliste.

La première partie de ce compte rendu met en évidence l'insuffisance du modèle TRAPU pour une application de visualisation interactive photoréaliste.

La deuxième partie du compte rendu est consacrée à différents algorithmes d'extraction de primitives que nous avons étudiées. L'objectif de cette étude est de proposer un algorithme permettant d'obtenir une structure contenant des informations structurales pertinentes obtenues sur une unique image. Une telle structure permet d'envisager une réduction de la combinatoire des algorithmes d'appariement.

Modèle TRAPU et textures

L'obtention d'un modèle texturé photoréaliste à partir d'un modèle TRAPU n'est pas directement envisageable. Le modèle étant reconstruit à partir de photographies aériennes, il est fortement généralisé, et ne correspond pas nécessairement à la réalité perceptible sur les clichés terrestres, ce qui pose d'évidents problèmes de raccord (image C.1.4.1) ou d'occlusions (dues, par exemple, à la présence d'objets non modélisés). De plus, certains objets n'ont pas été saisis, ce qui nuit au réalisme de la scène reconstruite (images C.1.4.2 à C.1.4.4).

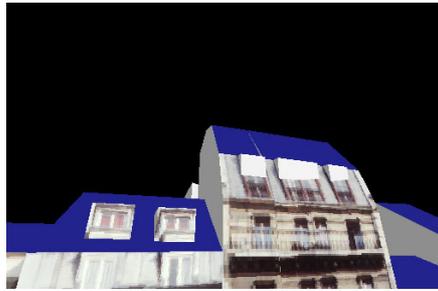


image C.1.4.1 : problèmes de raccords

Les parties cerclées sur les images C.1.4.2 à C.1.4.4 mettent en évidence différents problèmes. Sur l'image C.1.4.1, nous pouvons remarquer l'inadéquation du modèle et des mansardes à droite, et le débordement des mansardes (à gauche) sur la facette représentant le toit. Sur les images C.1.4.2 à C.1.4.4, nous démontrons l'effet visuel produit par l'absence de certains objets volumiques sur le modèle texturé.

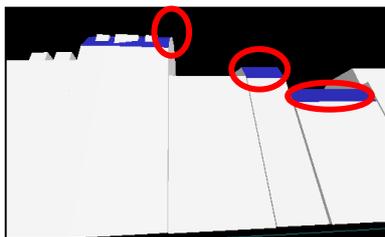


image C.1.4.2 : modèle initial



image C.1.4.3 : cliché terrestre



image C.1.4.4 : modèle reconstruit

Il est alors nécessaire de reconstruire une partie de la géométrie des façades, ce qui peut être envisagé, soit en 2-D (modèle numérique de profondeur), soit en 3-D (modèle à facettes, BREP, etc,...), ou bien de trouver les arêtes des façades, de façon à calculer une transformation géométrique permettant d'adapter les textures extraites des images à la géométrie du modèle.

Extraction de primitives

Deux algorithmes ont été développés. Le premier permet une détection de segments de droites. Le second est une compensation adaptée à la détection de points de fuites.

L'idée initiale de notre travail sur l'extraction de primitives est d'obtenir une structure topologique de l'ensemble des contours d'une image. Elle peut être obtenue en segmentant une carte topologique discrète, construite à partir des contours d'une image, en différenciant types de primitives dont les modèles appartiennent à un ensemble de modèles déterminés. La conservation des relations topologique lors de la segmentation permet de garantir la cohérence globale des différents types de primitives extraites.

La carte de contours initiale peut être construite à l'aide d'algorithmes permettant l'obtention des crêtes du module du gradient de l'image initiale. Plusieurs algorithmes de ligne de partage des eaux ont été étudiés.

L'algorithme de Marc Pierrot Deseilligny [DESEILLIGNY et al 98] a été retenu et utilisé pour obtenir la carte de contours initiale. Cet algorithme a été testé sur des images terrestres (images C.1.4.5 et C.1.4.6). Le résultat peut être simplifié par seuillage par hystérésis des courbes maximales locales (image C.1.4.7) ou d'autres pré- ou post-traitements.

Le problème d'extraction de primitives linéaires (segments de droites, courbes d'ordre plus élevé) proposé [MARCHADIER, MICHELIN 99] est fondé sur un problème d'étiquetage optimal de la carte topologique précédemment introduite. Le problème de segmentation suivant des modèles donnés est ramené à un problème d'optimisation d'une fonction de coût globale.

Un algorithme sous-optimal de détection de segments de droites a été dérivé du problème général, et permet l'obtention d'une solution exploitable (image C.1.4.8), au moins comparable à des résultats d'algorithmes déjà publiés. Les extrémités des segments extraits sont en général bien localisées, et les intersections des droites peuvent être trouvées de manière triviale.

Nous avons également développé un algorithme robuste d'extraction de faisceaux de droites. Il permet de déterminer la position des points de fuites d'une image, à condition de connaître approximativement les paramètres permettant de distinguer les groupes de droites parallèles. Il permet également d'extraire les alignements de segments,

et de filtrer d'éventuels segments n'appartenant pas au faisceau. L'approche utilisée ici est une approche photogrammétrique. Notons que les groupements initiaux peuvent être trouvés par transformée de Hough.



image C.1.4.5 : image initiale

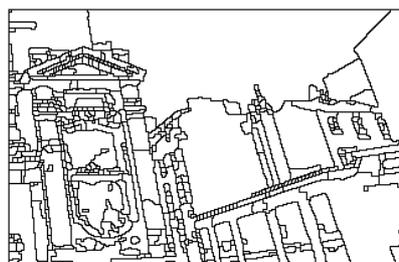


image C.1.4.6 : carte de contours



image C.1.4.7 : carte simplifiée



image C.1.4.8 : droites extraites de plus de dix pixels de long

Suite

Deux points principaux sont envisagés pour la suite de nos travaux. Le premier point consiste à proposer des extensions de notre méthode d'extraction de primitives. L'extension de cette méthode à des courbes d'ordre plus élevé et à des régions est envisagée. Le deuxième point concerne l'appariement du modèle et des images terrestres, qui bénéficie d'une littérature fournie.

Référence

[DESEILLIGNY et al 98] M. Pierrot Deseilligny, G. Stamon & C.Y. Suen : *Veinerization : A New Shape Description for Flexible Skeletonization*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20(5), pp. 505-521, laboratoire MATIS, IGN-SR 980036/C-COM, 1998.

Publication

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

C.1.5 Reconstruction du bâti pour la cartographie à grande échelle

Frank Fuchs

Travaux effectués

Cette année constitue la seconde année de thèse, débutée fin 1997. Elle a été axée principalement sur la mise en correspondance entre les modèles de bâtiments et les données. On rappelle que les modèles sont des graphes relationnels attribués : chaque nœud représente un objet géométrique 3-D dans l'espace objet (portions de plans, et segments de droites), aussi appelé *primitive*. Les arcs représentent des relations géométriques que respectent les primitives, ou *contraintes*. Ils portent des attributs valués, qui représentent la nature de la contrainte (par exemple : parallélisme, inclusion).

La valuation d'un attribut est comprise entre 0 et 1. Dans le cas des modèles, la valuation est binaire : elle vaut 1, si la contrainte est requise, 0 sinon. Dans le cas des données, la valuation de l'attribut représente la compatibilité entre la géométrie des primitives et la contrainte.

À partir des données (n primitives calculées dans les images), on forme le graphe des données. Il s'agit du graphe complet à n nœuds et dans lequel chaque arc entre deux primitives p et q possède un attribut pour chaque contrainte introduite dans le système. Chacun de ces attributs est valué par la compatibilité de p et q avec la contrainte correspondante. Une fois ce graphe formé, on procède à l'appariement du modèle et des données.

Cet appariement utilise le formalisme de *distance d'édition*. On considère une petite famille de transformations élémentaires d'un graphe : suppression d'un arc, changement de label. Une *édition* est une séquence de transformations élémentaires. Les éditions possèdent des coûts.

Le principe de l'appariement consiste à trouver l'édition de coût minimal, telle que le graphe modèle transformé par cette édition est *isomorphe* à un sous-graphe du graphe des données. L'isomorphisme ainsi obtenu permet d'identifier dans les primitives celles qui font partie de l'objet géométrique recherché. La technique d'appariement utilisée fait partie des techniques de calcul d'isomorphisme de sous-graphe avec tolérance d'erreur. Elle est déterministe et relativement performante. Elle tire notamment profit des sous-parties communes aux modèles, ce qui est fréquent dans le cas du bâti.

On a pu montrer la bonne résistance de la méthode aux sous-détections (notamment pour les primitives linéaires). Par ailleurs, les techniques employées ont permis de lutter correctement contre la combinatoire du problème, même si dans le cas de données plus complexes que les cas traités, cela peut toujours être un souci. La bonne complémentarité entre les deux types de primitives utilisés a été montrée : on y trouve un gain en robustesse et en rapidité.

Enfin, le modèle initialement utilisé (deux types de primitives) a été étendu à un troisième type : les discontinuités fortes du MNE. Celles-ci apportent, en effet, une information complémentaire de celle apportée par les primitives planes et linéaires (notamment en cas de sous-détection des gouttières), et s'intègrent naturellement dans le système. Comme après appariement, certains nœuds du modèle ne sont pas appariés aux données : il est nécessaire de compléter le modèle en exploitant la géométrie des primitives appariées, et les contraintes géométriques. Cette étape, qui nécessite l'introduction des primitives *ponctuelles* dans le modèle, est en cours d'étude. L'exploitation simultanée de plusieurs modèles a été partiellement abordée. Le processus de décision associé n'est pas encore établi, ainsi que la gestion d'un nombre réellement intéressant de modèles.

Les travaux ont donné lieu à deux publications. La première [FUCHS, LE MEN 99a] concerne les travaux d'extraction des primitives planes de 1998. La seconde [FUCHS, LE MEN 99b] concerne les travaux d'appariement proprement dits.

Suite des travaux

On s'attachera à choisir correctement le modèle pour une scène donnée (processus de décision), puis à utiliser un système de gestion dynamique des modèles (type "syntaxique") afin d'étendre et d'adapter la base de modèles aux données.

Publications

[FUCHS, LE MEN 98a] F. Fuchs, H. Le Men : *Detecting planar patches in urban scenes*, à paraître dans Proceedings of SPIE, Visual Information Processing VIII, volume 3716, April 1999, Orlando (USA), laboratoire MATIS, IGN-SR 980037/C-COM, 1998.

[FUCHS, LE MEN 98b] F. Fuchs, H. Le Men : *Building reconstruction through multi-primitive graph matching*, in Actes du 2nd IAPR Workshop on Graph-based Representations, May 1999, Vienna (A), laboratoire MATIS, IGN-SR 980038/C-COM, 1998.

C.1.6 Reconstruction de modèles de bâtiments à partir de données cadastrales vectorisées et d'un couple d'images aériennes à haute résolution

Hassan Jibrini

Rappel du contexte de l'étude

L'objectif de notre travail est l'extraction automatique d'un modèle 3-D polyédrique de bâtiments à partir, d'une part, de données 2-D décrivant l'emprise planimétrique des bâtiments provenant de la vectorisation de plans cadastraux (échelle en général au 1 : 1 000), et, d'autre part, d'un couple d'images aériennes numérisées à haute résolution (16 cm par pixel). Les données issues de la vectorisation du cadastre sont utilisées afin de réduire fortement la combinatoire du processus d'interprétation du couple d'images aériennes.

Dans l'approche actuelle, nous faisons l'hypothèse que les données 2-D issues des plans cadastraux sont correctes et nous ne les remettons pas "fortement" en cause. Le seul type d'écart que l'on modélise entre ces données et la réalité planimétrique un écart géométrique de l'ordre de quelques mètres (écarts possibles entre le toit de l'image et les façades du cadastre).

On ne cherche donc pas à faire de corrections topologiques sur les données 2-D et, *a fortiori*, on ne cherche pas à traiter les bâtiments absents ou surnuméraires du plan cadastral. Sous ces hypothèses, le problème se réduit alors à, d'une part, rechercher à l'intérieur de l'emprise d'un bâtiment une description des toits sous forme d'un ensemble de plans 3-D et, d'autre part, à affiner la position planimétrique des contours du bâtiment. Actuellement nous ne traitons que les bâtiments isolés et à toits simples (plat ou bi-pente), mais l'objectif final de notre travail est l'extraction d'un modèle générique de bâtiments ou d'un îlot complet de bâtiments agrégés.

Travaux effectués

Notre travail, dans le courant de l'année 1999, a été consacré à faire l'état de l'art, d'une part, et de l'autre part, à développer les quatre idées principales suivantes.

Recalage 3-D des éléments du cadastre

Ce processus est destiné à reconstruire les limites de gouttières. Il est appliqué pour chaque ligne polygonale 2D issue de la base de données vecteurs, donc pour chaque bâtiment individuellement. Il est effectué de la manière suivante :

- pour "dégrossir" le problème, on fait une estimation globale de l'altitude moyenne du bâtiment, en supposant dans un premier temps que la ligne est horizontale. Cette altitude est calculée à partir d'un MNE construit localement à l'intérieur de l'emprise du bâtiment. Cette estimation du contour 3-D est grossière mais robuste,
- on effectue ensuite un recalage où, pour chaque segment de la ligne, on cherche la meilleure position par un déplacement vertical en z et perpendiculaire au segment en planimétrie ; on suppose donc que les segments sont horizontaux,
- étant donné que les limites de gouttières ne sont pas toujours horizontales, les déplacements planimétriques sont plus robustes que les altimétries. Donc, on positionne tous ces segments à l'altitude médiane trouvée à la première étape en gardant les déplacements horizontaux et en assurant la fermeture de la ligne recalée par l'intersection entre les segments,
- enfin, on discrétise la nouvelle ligne polygonale en petits segments élémentaires pour lesquels on cherche individuellement la meilleure altitude par programmation dynamique avec une contrainte de continuité.

Les résultats de ce processus dépendent fortement de trois points suivants :

- contraste des bords des toits,
- visibilité des bords des toits,
- angle entre le segment cadastral et le plan épipolaire.

Il semble que la qualité de ces résultats puisse être nettement améliorée par l'utilisation d'images multiples plutôt que d'un seul couple de photos.

Recherche de plans orientés

On cherche maintenant à reconstruire la surface du toit sous la forme d'un ensemble de plans. Lors de cette étape, les données du cadastre ont une triple utilisation :

- focaliser les algorithmes sur des portions de terrain *a priori* intéressantes,
- éviter quelques problèmes classiques de corrélation, dus aux discontinuités, en restreignant les calculs à l'intérieur d'une zone où le relief est *a priori* continu (mais non dérivable),
- et surtout, donner des directions privilégiées de recherche de plans.

La recherche de plans portant les facettes 3-D décrivant le toit s'effectue dans l'espace objet et est contrainte par la ligne polygonale 2-D. Notre approche consiste à construire un parallélépipède de corrélation dans lequel on cherche à faire passer les deux meilleurs plans de toit de direction opposée en optimisant le score des coefficients de corrélation des points associés à chaque plan. Les résultats obtenus pour des toits de bi-pentes sont de très bonne qualité. Une extension de ce processus pour des modèles plus compliqués est possible.

Fusion des résultats du recalage et des plans orientés

Pour construire les limites externes du toit en 3-D, les plans trouvés précédemment sont intersectés par des plans verticaux s'appuyant sur les segments de la nouvelle ligne polygonale trouvée par le recalage.

Appariement des régions

Cette approche est destinée à chercher un modèle de toits plus générique à partir des plans supports des régions. La segmentation par régions est effectuée sur l'image gauche.

Les paramètres des plans sont calculés indépendamment pour chaque région de la manière suivante :

- recherche de centre de gravité de région $C(x, y)$,
- les paramètres de plan sont définis par (z, α, β) , où z est l'altitude de centre de gravité C, α est l'angle avec le vertical passant par le centre C, et β est l'angle avec l'axe x,
- afin de réduire l'ambiguïté et le temps du calcul, l'angle β est restreint à deux directions privilégiées issues de la ligne polygonale cadastrale. Il s'agit de la direction du segment le plus long et son orthogonale,
- un plan $P(z, \alpha, \beta)$ permet de déterminer un ensemble de points de l'image droite correspondant aux points de région sélectionnée dans l'image gauche,
- l'appariement de deux ensembles de points est fait avec la covariance,

- le plan sélectionné est celui qui possède le meilleur coefficient de corrélation.

Les principaux problèmes que l'on rencontre se justifient par les trois points suivants :

- l'appariement avec la covariance est robuste mais pas précis,
- l'hypothèse que la région représente un seul plan n'est pas toujours vraie, surtout dans le cas où le toit serait saturé ou les régions sont sous-segmentées,
- le processus est très sensible aux cheminées et chiens assis.

Publications

[JIBRINI et al 00a] H. Jibrini, M.P. Deseilligny, N. Paparoditis et H. Maître : *Reconstruction de modèles de bâtiments à partir de données 2-D cadastrales vectorisées et d'images aériennes*, soumis à RFIA'2000, Paris (F), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-005/C-COM-HJ, 2000.

[JIBRINI et al 00b] H. Jibrini, M.P. Deseilligny, N. Paparoditis et H. Maître : *Automatic Building Reconstruction from Very High Resolution Aerial Stereopairs Using cadastral Ground Plans*, soumis à ISPRS'2000, Paris (F), laboratoire MATIS, IGN-SR 00-006/C-COM-HJ, 2000.

C.1.7 Multi-corrélations ponctuelle sur Le Mans

Philippe Hottier

Le but général est l'étude de l'apport de la multi-corrélations (quatre clichés) dans un processus d'extraction de bâti ; dans la première phase, dont nous rendons compte sommairement ici, nous avons construit un corrélateur ponctuel et estimé sa précision. Les essais ont concerné une zone commune à quatre clichés de la couverture du Mans, (deux couples situés dans deux bandes parallèles).

La caméra est numérique :

- focale 2644,63 pixels,
- format 2048 x 3071 pixels ; 1 pixel = 9 μ m,
- altitude de vol = 950 m environ,
- pixel terrain = environ 40 cm,
- rapport b/h = 0,30 dans une bande, 0,43 de bande à bande ; 0,49 et 0,59 pour les couples diagonaux.

Le principe du corrélateur multi-épipolaire qui a été mis au point est le suivant : pour un point-image maître du cliché 1, on sélectionne sur chacune des trois épipolaires 2, 3 et 4, les dix meilleurs candidats image homologues d'où dix candidats 3-D.

On recherche ensuite pour les six combinaisons épipolaires (23, 32, 24, 42, 34, 43), en commençant par le meilleur candidat de la première épipolaire de chaque couple, le candidat le plus proche sur la seconde. On définit ainsi, en tout et au plus quatre points-image homologues sur chaque épipolaire, dont on prend la moyenne qui définit le point-image homologue du point-image maître sur cette épipolaire. On calcule ensuite la détermination 3-D finale, en compensant les quatre points-image, ou, autre option, en fixant le point-image maître.

Dans cette première phase, la recherche se fait, soit, sur une épipolaire, soit, sur l'épipolaire et deux droites parallèles distantes de l'épipolaire de 1 pixel. On poursuit ensuite, sur option, en procédant à un affinement subpixelaire 1-D ou 2-D, au pas de 1/3 ou 1/5 de pixel.

Les paramètres essentiels sont : la taille de la fenêtre (on s'est borné à étudier 7 x 7 ou 9 x 9), la tolérance inférieure sur le coefficient de corrélation de deux fenêtres (choisi par défaut, conformément aux règles statistiques classiques), la valeur maximale de l'écart acceptable entre deux déterminations 3-D correspondant à deux déterminations épipolaires différentes, et les choix recherchés sur une seule droite épipolaire ou trois, corrélation simple seulement ou corrélation simple suivie d'affinement subpixelaire (pas 1/3 ou 1/5), 1-D ou 2-D.

Deux méthodes d'estimation de la précision ont été proposées et utilisées sur une quinzaine de fichiers de points-image pointés à l'écran sous grossissement 5, (ces fichiers sont de deux types : points situés sur des éléments linéaires de contraste : points-sol sur bords de bandes blanches, points sur arêtes faîtières horizontales ; points sur bords de toits ; points à définition ponctuelle : points-sol extrémité de bandes blanches ; pignons).

La méthode des triplets permettant d'estimer la précision d'alignement des déterminations 3-D relatives à des triplets de points-image maître alignés, proches (distance inférieure, entre deux points, à trois-quatre pixels), situés sur des éléments linéaires de contraste et pointés à l'écran sous grossissement 5 ; les trois points-image maîtres fournissent alors par corrélation trois déterminations 3-D et donc une estimation de l'emq planimétrique et une estimation de l'emq altimétrique. Pour des triplets au sol (bandes blanches) et avec quatre clichés on obtient une précision planimétrique de 4-5 cm (emq planimétrique).

Pour l'emq en x ou en y divisé par $\sqrt{2}$) et de 7-8 cm en altimétrie ; pour des triplets choisis sur des arêtes faîtières horizontales dont la direction coupe franchement les épipolaires, la précision planimétrique est identique et la précision altimétrique légèrement inférieure ; pour des triplets de points choisis sur des bords de toits coupant franchement les épipolaires la précision est évidemment moins bonne : la perte est en gros de 50%.

Fenêtre	sub-pix	emq _{plani} '	emq _{alti} '	acceptés	emq _{plani}	emq _{alti}	σ_0
7 x 7	1 / 1	3,9	6,1	105 / 107	4,1 / 4,3	12,8 / 13,8	0,14
-	1 / 3	3,2	6,7	-	3,7 / 3,8	10,1 / 11,3	0,10
-	1 / 5	3,0	6,4	-	3,7 / 3,9	9,0 / 9,8	0,10
9 x 9	1 / 1	3,8	6,1	-	4,7 / 5,0	13,2 / 16,8	0,19
	1 / 3	3,5	7,9	-	3,8 / 3,9	11,4 / 13,0	0,14
-	1 / 5	3,2	7,5	-	3,9 / 4,2	10,7 / 13,1	0,17

Cent dix arêtes faîtières attaquant franchement les épipolaires ; emq_{alti}' et emq_{plani}' sont des estimations obtenues par la technique de la médiane, emq_{alti} et emq_{plani} les moyennes quadratiques des emq.

On a d'autre part calculé les écarts moyens quadratiques planimétrique et altimétrique entre déterminations 3-D relatives à deux configurations distinctes (après superposition par similitude des deux ensembles de points) : ce sont les suivants (329 points retenus sur 330) :

7 x 7 : (1/1 - 1/3) : ecmq_{plani} = 4,7 cm ; ecmq_{alti} = 15,0 cm,

7 x 7 : (1/3 - 1/5) : ecmq_{plani} = 1,6 cm ; ecmq_{alti} = 5,7 cm,

9 x 9 : (1/3 - 1/5) : ecmq_{plani} = 1,9 cm ; ecmq_{alti} = 6,4 cm,

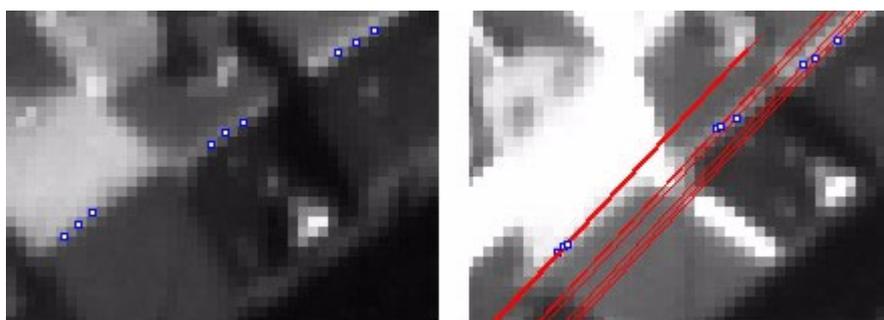
7 x 7 (1/1) - 9 x 9 (1/1) : ecmq_{plani} = 2,4 cm ; ecmq_{alti} = 8,6 cm,

7 x 7 (1/3) - 9 x 9 (1/3) : ecmq_{plani} = 2,7 cm ; ecmq_{alti} = 8,5 cm,

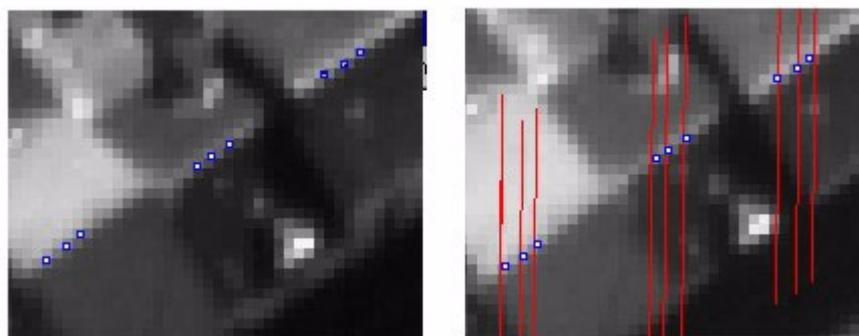
7 x 7 (1/5) - 9 x 9 (1/5) : ecmq_{plani} = 2,2 cm ; ecmq_{alti} = 7,6 cm.

La méthode des quatre points-image permet d'apprécier la cohérence de quatre points-image homologues ; elle consiste à estimer les emq planimétrique et altimétrique des quatre déterminations 3-D obtenues en choisissant tour à tour chaque point-image comme point-image maître.

Sur un fichier de points-image corrélés visuellement sous grossissement 5 (moitié pignons de maisons, moitié extrémités de bandes blanches) on a trouvé ainsi 10 cm en altimétrie et 15 cm en planimétrie ; sur un fichier de points-image dont un seul pointé visuellement (les trois autres étant déterminés par corrélation automatique) on a trouvé 10 cm en altimétrie et 5 cm en planimétrie.



*Médiocrité de la corrélation quand le point image maître (à gauche) est situé sur un élément linéaire de contraste quasi parallèle à l'épipolaire, grossissement 5.
Côté du spot : 4/5 de pixel (1 pixel = 40 cm terrain).*



Les résultats essentiels de l'étude sont les suivants :

- avec quatre clichés, l'exactitude locale maximale pour des points sur éléments linéaires de contraste au sol ou sur arêtes faîtières horizontales avec attaque franche de toutes les épipolaires est chiffrée par une emq planimétrique de 2,5 cm et une emq altimétrique de 6 cm ; ceci suppose l'emploi d'une fenêtre de taille supérieure ou égale à 5 et une corrélation subpixelaire. Pour des points sur bords de toit (toujours avec attaque franche des épipolaires), les estimations sont 4 cm pour la planimétrie et 12 cm pour l'altimétrie. Pour des points situés sur éléments linéaires de contraste coupant une épipolaire sous un angle faible, les emq sont de l'ordre de 6 cm en planimétrie et de 25 cm en altimétrie. Pour des points à définition ponctuelle et dont les quatre points-image ont été pointés visuellement à l'écran sous grossissement 5, l'emq planimétrique peut être estimée à 12-14cm et l'emq altimétrique à 6-8 cm. L'exactitude locale minimale (fenêtre 3 x 3 et corrélation simple) est caractérisée par une emq planimétrique de 9 cm et une emq altimétrique de 25 cm, ceci pour points sur éléments linéaires de contraste au sol ou sur arêtes faîtières horizontales avec attaque franche des épipolaires (§8g, 2 et 3). Pour points sur bords de toits, les emq sont un peu supérieures : 9,5 cm et 30 cm.

- Avec deux clichés :

- La perte de précision altimétrique peut être très sensible ; par exemple, pour points sur arêtes faîtières (fenêtre de taille supérieure à 3 et corrélation subpixelaire), de 7 cm on passe à 15-20 cm en couple horizontal ou vertical. On peut escompter au mieux 5 cm en planimétrie et 14 cm en altimétrie pour le rapport $b/h = 0,59$ (6cm, 19 cm pour $b/h = 0,49$).

Il est possible que la perte constatée soit due en partie à un systématisme résiduel d'étalonnage de la caméra. Par ailleurs, le taux d'échec même en fenêtre de taille supérieure à 5, s'accroît notablement : quand, pour des triplets, le taux d'acceptation avec quatre clichés est supérieur à 95% il baisse à 85-90% avec un couple. Bien entendu, pour des points situés sur des éléments linéaires de contraste faisant un angle faible avec l'épipolaire, la précision est particulièrement médiocre : on descend au mieux à 10 cm en planimétrie et 45-50 cm en altimétrie.

- L'emploi de la fenêtre 3 x 3 est calamiteux, non pas tant par la perte de précision pourtant très importante même en corrélation subpixelaire, que par le taux d'échec, qui cette fois, à la différence de la multi-corrélation avec quatre clichés, est considérable ; par exemple, pour un fichier de points-sol, soixante-dix triplets seulement sur cent dix ont été acceptés. Une autre manière de considérer la question est de superposer par similitude les déterminations 3-D issues de la configuration (quatre clichés + fenêtre 7 x 7 + corrélation subpixelaire) à celles issues d'une configuration (couple diagonal + fenêtre 3 x 3 + corrélation simple ou subpixelaire) : on trouve alors, pour le même fichier, cent soixante deux points sur trois cent trente dont l'écart est supérieur à un mètre. D'une manière générale, le taux d'échec estimé par la méthode précédente oscille entre 55% et 25%. Dans le cas de points situés sur bords de toits, beaucoup de ces échecs sont dus à de fausses corrélations : l'environnement radiométrique en fenêtre 3 x 3 est trop pauvre pour résoudre les ambiguïtés.
- La comparaison des résultats obtenus avec mise en place des clichés sur les éléments *ORRI* avec ceux mis en place sur les éléments de la compensation I (éléments fournis par la compensation de trois cents points pointés visuellement sous grossissement 5 sur les quatre clichés), semble montrer que la première est insuffisante : la perte d'exactitude (due au positionnement incorrect des épipolaires) peut être chiffrée en moyenne quadratique à 8 cm en planimétrie et 17 cm en altimétrie pour des fenêtres de taille supérieure à 3 et en corrélation subpixelaire.
- Pour les points situés sur des éléments linéaires de contraste, la recherche des points homologues doit se pratiquer uniquement (sauf s'il y a échec) sur l'épipolaire et non sur plusieurs droites situées de part et d'autre. En particulier, l'affinement (corrélation subpixelaire) doit être 1D et non 2D. À défaut, on observe pour les points sur arêtes faîtières ou sur bords de toit, une perte de précision très sensible (50 % en altimétrie), que ce soit avec quatre ou deux clichés, car avec un couple un point-image homologue choisi en dehors de l'épipolaire induit une variation de la parallaxe longitudinale (sauf si l'élément linéaire de contraste est perpendiculaire à l'épipolaire), et, avec quatre clichés une variation de la parallaxe longitudinale sur deux couples au moins. Cette perte de précision en affinement 2-D n'a pas été observée sur les points au sol, sans doute parce que leur environnement est beaucoup plus riche que celui de points sur arêtes faîtières.

Par contre pour des points à définition ponctuelle l'affinement 2-D est de loin préférable.

- La qualité de la radiométrie a peu d'influence sur la précision des résultats.
- Le taux de réussite du corrélateur avec quatre clichés (il y a réussite si au moins un point-image homologue a été trouvé) est voisin de 100% en fenêtre 7 x 7 ou 5 x 5, mais tombe à 92% en fenêtre 3 x 3. Le taux de tri-déterminations est de 90% et le taux de mono-déterminations de 6 % (63% et 20% en fenêtre 3 x 3).

Avec deux clichés, le taux de réussite reste toujours voisin de 100%, en fenêtre 7 x 7, mais tombe à 82% en fenêtre 3 x 3.

Avec quatre clichés, le taux de validité (pour des triplets de points-image maître situés sur des éléments linéaires de contraste), c'est-à-dire le pourcentage de triplets acceptés, est voisin de 100% pour des points sur arêtes faitières horizontales et quelque soit la taille de la fenêtre ; mais pour des points sur bords il chute à 88%.

Avec deux clichés, le taux de validité chute : pour le couple diagonal ($b/h = 0,59$), et pour des points sur arêtes faitières il est de 85/90% en fenêtre de taille supérieure à 3, de 60% en fenêtre 3 x 3.

Pour des points sur bords, il est de 70% en 7 x 7, de 55% en 5 x 5 et 40% en 3 x 3. Avec le couple horizontal ($b/h = 0,43$), on observe un taux de validité de l'ordre de 90%, quelle que soit la fenêtre pour des points sur arêtes faitières et de 70% pour les points sur bords.

Il semble y avoir un systématisme résiduel d'étalonnage de la caméra très régionalisé pouvant atteindre 0,3 pixel en amplitude ; nous n'avons pas pu prouver son existence. Il se trouve qu'il reste transparent dans presque tous les essais. De même que la question des déformations du modèle perspectif induites par une orientation relative insuffisante, il conviendrait de l'étudier soigneusement, en tout cas si on désire obtenir sur l'ensemble d'un couple une exactitude homogène. Les 2,5 cm en planimétrie et les 6 cm en altimétrie que nous avons obtenus, ne reflètent en effet qu'une exactitude locale (sans doute valable sur toute l'étendue d'un bâtiment moyen d'emprise 25 x 25 m).

Si on ne maîtrise pas dans l'avenir ces deux causes de systématisme, on risque de constater, en superposant des bâtiments issus, par exemple, de couples différents, une translation aléatoire propre à chaque bâtiment pouvant dépasser la vingtaine de centimètres.

Référence

[HOTTIER 99] Ph. Hottier : *Multi-corrélation ponctuelle et précision sur Le Mans (caméra numérique, résolution 9 μ m, focale 2700 pixels)*, rapport, laboratoire MATIS, IGN-SR 990029/C-RAP, novembre 1999.

C.1.8 Reconstruction du bâti pour la cartographie à grande échelle

Patrick Julien

Travaux effectués

Restitution de bâtiments sous forme de modèles 3-D ajustés par corrélation d'ortho-imagettes.

On rappelle que le principe de la restitution d'un bâtiment (dans un couple stéréoscopique de photographies) consiste à ajuster un modèle 3-D du bâtiment, en cherchant à maximiser la ressemblance entre deux imagettes redressées à l'aide de ce modèle, ou ortho-imagettes.

L'ajustement suppose de connaître un modèle approché, qu'on améliore par petites retouches des différents paramètres du modèle, jusqu'à ce que la ressemblance ne puisse plus être accrue.

Les essais des années précédentes ont déjà montré que la méthode fonctionne raisonnablement lorsque le modèle approché est obtenu à l'aide d'un pointé à l'écran, en circonscrivant le bâtiment par un rectangle dans chaque photographie.

Dans le but de supprimer le pointé à l'écran, on a d'abord tenté en 1999 d'utiliser les bâtiments figurant sur la carte à 1 : 25 000, numérisée et vectorisée, l'altitude étant donnée par la base de données altimétriques IGN.

Cette approche ne semble pas viable pour les raisons suivantes : sur la zone-test d'Altkirch, une majorité de bâtiments visibles sur les photographies (1 : 30 000, numérisées à la résolution-sol 0,50 m) ne figurent pas sur la carte ; ensuite, parmi ceux, figurant sur la carte, seulement une minorité sont de forme rectangulaire, conformes à notre modèle 3-D ; pour ceux-ci, leur emprise est souvent trop grande à cause de la généralisation, et décalée, donnant un modèle 3-D approché trop imprécis.

On a ensuite tenté d'extraire sur la même zone-test les modèles 3-D approchés d'un MNE fabriqué au laboratoire MATIS. Ce MNE donne des modèles 3-D encore trop imprécis pour l'état actuel de notre méthode ; mais on ne peut pas pour l'instant conclure à une impossibilité par cette approche.

On a optimisé le calcul des ortho-imagettes, en ne calculant, lorsqu'on fait varier un peu un paramètre, que les parties modifiées des deux ortho-imagettes : division du temps de calcul par un facteur 2,5 - 3. On a aussi introduit une maximisation par groupes de paramètres, ce qui permet d'explorer un espace de possibilités plus grand, et donc d'autoriser des modèles 3-D moins précis.

Toujours sur la zone-test d'Altkirch, on a restitué, via un pointé à l'écran, un total de cent quarante deux bâtiments, dont quatre-vingt deux conformes à notre modèle 3-D (modèle à neuf paramètres : x,y du centre maison, z du pied maison, longueur l, largeur k, hauteur gouttière h, angle d'orientation a, hauteur de la toiture t, forme du toit f).

Une analyse visuelle des bâtiments superposés aux photographies montre que soixante-seize sur les quatre-vingt deux ont une orientation et une forme satisfaisante.

C.1.9 Restitution automatique des carrefours routiers guidée par la BDCarto

Nicolas Boichis

Contexte - objectifs

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse effectuée à l'IGN par Nicolas Boichis, ayant débutée en novembre 1996. Elle est dirigée par Jean-Pierre Cocquerez (ENSEA).

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 (BDCARTO), 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.

Travail réalisé

Le travail réalisé durant cette dernière année de thèse s'est principalement focalisé sur le problème des ronds-points. Trois traitements d'extraction ont été identifiés pour caractériser les formes présentes : la route circulaire, les routes simples excentrées arrivant sur le rond-point et les zones intermédiaires. Ces zones intermédiaires sont caractérisées par la présence de pattes d'oies donc par la présence d'un séparateur de forme quasi triangulaire.

Le module d'extraction des pattes d'oies s'appuie sur la propriété de divergence géométrique et de symétrie radiométrique entre ces deux routes. La mise en place de fonctions dédiées à la reconstruction des branches était nécessaire pour introduire une connaissance liée à la continuité géométrique et radiométrique des routes. Cette fonction nous permet de filtrer certaines sur-détections et ainsi faire émerger le meilleur groupement entre les pattes d'oies et les routes simples.

La dernière phase de ce travail s'est attachée à donner une validation expérimentale de notre système. Nous nous sommes limités au cas des ronds-points afin de démontrer l'intérêt d'un système dédié aux carrefours et surtout de déterminer l'évolution de l'information au sein du système. Nous avons proposé un protocole de saisie d'une référence et des mesures de qualité d'appariement.

Un échantillon relativement important nous a permis de démontrer que l'analyse locale était bien souvent dépendante du contexte. Cette forte ambiguïté locale semble se résorber lors du processus de reconstruction globale améliorant sensiblement la fiabilité du système au détriment de l'exhaustivité. L'échantillon nous a cependant semblé insuffisant pour proposer une analyse complète du mécanisme d'auto-évaluation et ainsi proposer une classification correcte des résultats fournis par le système.

Contributions du travail effectué

Une analyse détaillée du problème des carrefours doit servir dans le futur aux différents systèmes s'intéressant à l'extraction de routes. Notre modélisation des carrefours est un élément important qui doit servir à la mise en place d'un tel système.

Dans les différents cas de carrefours traités, nous avons vérifié qu'il est nécessaire de mettre en place une stratégie très précise d'interprétation. L'introduction de plus en plus fréquente de données externes nous permet de réduire considérablement le poids du traitement de l'image. Pour cette raison, l'interprétation de ces données externes nous a semblé être un point fondamental. Nous avons aussi considéré qu'il était plus intéressant d'avoir une approche locale par focalisation en choisissant préférentiellement la sur-détection. Cette dernière nous permet de ne pas filtrer l'information trop tôt et surtout de toujours s'assurer que la bonne solution est présente dans notre liste. Dès lors, les processus de reconstruction doivent être absolument efficaces pour faire émerger l'information pertinente.

En ce qui concerne les différents mécanismes d'auto-évaluation, nous avons proposé un certain nombre de mesures de confiances adaptées aux différents objets considérés. Nous avons pu démontrer que dans l'état, le système semble relativement bien séparer l'information pertinente des sur-détections évidentes. Enfin, la mise en place d'un protocole d'appariement entre la référence et une extraction issue de l'image pour les carrefours peut être utilisé dans l'évaluation d'une extraction globale du réseau routier.

Perspectives

Dans les suites à court terme à apporter aux différents traitements d'extraction et de reconstruction, il serait utile de travailler sur un échantillon relativement homogène pour calibrer le système. Ce travail permettrait de valider les traitements ainsi que les mécanismes d'auto-évaluation. Cette étape est primordiale pour espérer améliorer le nombre de ronds-points totalement reconstruits. Enfin, l'intégration des différents traitements mis en place devrait améliorer les résultats obtenus jusqu'à présents par les différents travaux menés préalablement au laboratoire MATIS.

Publications

[BOICHIS 99] N. Boichis : *Extraction automatique des carrefours routiers dans les images aériennes, guidée par une base de données cartographique*, thèse de doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, laboratoire MATIS, IGN-SR 990034/C-THE, 1999.

[BOICHIS et al 99] N. Boichis, J.-M. Viglino et J.-P. Cocquerez : *Knowledge Based System for the Automatic Extraction of Road Intersections from Aerial Images*, laboratoire MATIS, IGN-SR 990033/C-COM, 1999.

C.1.10 Détection de changements par comparaison image-image

Franck Jung

Travaux effectués

Cette année constitue la seconde année de thèse, débutée fin 1997. Elle a été axée principalement sur le développement d'algorithmes de classification après focalisation et sur l'évaluation de ces algorithmes.

On rappelle que la stratégie de détection de changements envisagée comporte deux étapes. Une première étape dite de focalisation consiste à éliminer une grande partie de la scène considérée ne comportant pas de changements. Cette étape est basée sur la comparaison des MNE aux différentes dates. La seconde étape consiste à examiner, en utilisant des algorithmes dédiés, les régions sélectionnées par le processus de focalisation afin de classer ces régions en régions susceptibles de comporter des changements ou non.

Plusieurs techniques de classification ont été testées. Le processus final retenu est basé sur une extraction de primitives de type contours possédant une cohérence inter-dates. Ces primitives sont sélectionnées principalement par un critère d'appartenance au sursol.

Un processus de classification par arbre de décision des régions a été mis en place. Ce processus est basé sur un ensemble d'apprentissage. L'utilisation de primitives possédant une cohérence inter-dates permet de tester simultanément la présence d'un bâtiment et la présence d'un changement.

L'ensemble du processus a été évalué sur un couple stéréoscopique complet comportant une zone de recouvrement inter-dates de 3,5 x 3,5 km. Les images proviennent de la région de Mulhouse. L'intervalle de temps séparant les prises de vues est de quatre ans. Cette évaluation a montré une bonne exhaustivité du processus de focalisation. Compte tenu des fortes différences d'aspect de la végétation (différence de saison entre les prises de vues été/printemps), de nombreuses sur-détections liées à la végétation sont présentes à l'issue du processus de focalisation. Le processus de classification est en cours d'évaluation sur la zone. Les résultats sont conformes aux premières évaluations faites en 1998.

Parallèlement à l'évaluation de l'algorithme, une étude théorique ayant pour but la justification de l'approche par focalisation a été commencée. Un premier modèle a été mis en place dans le cadre du problème de reconnaissance (le problème de reconnaissance comprenant le problème de détection de changements).

Un premier modèle comprenant un ensemble de questions permettant de reconnaître un objet (ou un changement). À chaque question est associé un coût proportionnel à sa complexité algorithmique et une performance (puissance du test statistique). L'objectif est d'étudier dans quel ordre poser les questions. Des premières considérations sur le taux d'erreur des approches par focalisation ont été établies. Compte tenu de la charge importante de travail liée à l'évaluation des algorithmes, l'introduction des ombres dans les modèles de classification n'a pas été abordée. Néanmoins, une vérification d'hypothèse de bâtiment à deux dates différentes en intégrant des hypothèses d'ombre reste d'actualité.

Les travaux ont donné lieu à une soumission à ICCV'99, concernant l'approche globale [JUNG 99a]. Cet article a été complété par les développements récents dans [JUNG 99b].

Suite des travaux

On s'attachera à finir l'évaluation de l'algorithme de classification sur la scène de Mulhouse. La poursuite de l'étude théorique de l'approche par focalisation permettra de mettre en place des modifications éventuelles de l'approche focalisation/classification implantée.

Publications

[JUNG 99a] F. Jung : *Detecting New Buildings from Aerial Stereo Pairs at Different Dates*, ICCV'99, avril 1999, laboratoire MATIS, IGN-SR 99008/C-COM, 1999.

[JUNG 99b] F. Jung : *Détection de nouveaux bâtiments dans des imagerie*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 990027/C-RAP, 1999.

C.1.11 Détection de changements pour la mise à jour du réseau routier

Présentation : mise à jour du réseau routier

Le but de toutes les méthodes mises au point est de compléter, de mettre à jour la Base de Données Topographique (BD TOPO), de la manière la plus fiable et la plus exhaustive possible.

Deux moyens sont envisagés pour rendre rapidement opérationnelles les méthodes automatiques :

- le recours à des données externes fournies par une base de données externe ou par des cartes vectorisées,
- et le recours aux informations fournies par un opérateur.

L'objectif principal en recherche pour cette année 1999 était la capitalisation des outils existants, leur intégration dans une plate-forme et leur évaluation.

L'objectif principal en production est la mise à jour de la BD TOPO (ou BD TOPO ZR). Dans ce cadre, le but est d'exclure de l'examen de l'opérateur une grande partie de la surface de la scène traitée. Il s'agira donc d'exhiber de façon fiable les zones à reprendre.

Suivi semi-automatique de routes

Il s'agissait de récupérer les programmes de Sylvain Airault, pour le suivi semi-automatique de route sur photographie aérienne. La partie récupérée concerne le suivi sur orthophoto. Les algorithmes ont été portés en C++ sur GéoConcept.

Recalage de réseau routier sur photographies aériennes

Il s'agit de replacer un graphe routier sur une orthophoto, par détection de parallélismes dans l'image. L'algorithme assimile l'image à un milieu dans lequel se diffusent des sources lumineuses. Dans ce milieu, les lignes parallèles ont la propriété de conduire et d'accumuler la lumière telles des fibres optiques. On recherche ensuite par une technique de programmation dynamique le meilleur chemin dans cet espace d'accumulation. Cette recherche est guidée par une base de donnée et permet un recalage géométrique sur l'image.

Une plate-forme de recalage du routier a été réalisée. Elle intègre les résultats de l'action recherche "Extraction automatique des routes" (Ghislaine Bordes et de Laurent Guigues). Un certain nombre de fonctionnalités lui ont été incluses (découpage sur les fortes courbures, reconstruction des carrefours, visualisation des résultats) afin de la rendre fonctionnelle et d'évaluer le comportement des algorithmes.

Le but initial était de recalibrer une carte vectorisée sur une orthophoto (dans le cadre de la BD TOPO ZR). Cependant après évaluation des résultats sur la zone d'Altkirch, on constate une précision insuffisante pour une utilisation BD TOPO.

Ceci pour deux raisons :

- tout d'abord, le graphe initial carte-scannée n'est pas suffisamment propre et engendre des erreurs par la suite,
- de plus, l'algorithme ne permet pas de trouver le centre de la route avec suffisamment de précision (confusion avec le marquage au sol, avec le bas côté, problème des multivoies).

On constate cependant un recalage robuste et acceptable sur un certain nombre de cas et une bonne détection de la qualité du recalage. Cette recherche pourrait donc s'orienter vers un recalage du réseau BD CARTO afin d'en améliorer la précision (sans obtenir une précision BD TOPO). Dans ce cadre, le but est de ne pas dégrader la base initiale (au pire, les portions non recalées conservent la précision initiale). Une autre application concerne une mesure de précision par rapport à l'orthophotographie. On peut en effet, sur les zones correctement recalées mesurer automatiquement un écart à la réalité photo.

Enfin, rappelons que cette étape de recalage est indispensable dans le cadre de mise à jour automatique afin de faire la concordance BD-Image avant la recherche de nouveaux axes.

Détection de carrefours sur photographies aériennes

Dans le cadre du recalage de réseau routier, une partie de la recherche concerne la reconstruction de la topologie de la base initiale. On reconstruit donc les carrefours sur le graphe recalé. Une seconde étape consiste en une reconstruction plus approfondie des carrefours, en utilisant les résultats de la thèse de Nicholas Boichis. Une partie des travaux concernant la reconstruction des ronds-points est en cours d'intégration dans la plate-forme de recalage.

Il reste encore à faire l'évaluation fine des résultats avant d'intégrer le reste des travaux (carrefours quelconques, pattes d'oies). La détection de nouveaux carrefours servira de base à la recherche de nouvelles routes sur les images.

C.1.12 Détection de changements : Comparaison et fusion de segmentations d'images aériennes multidates

Laurent Guigues

L'année 1999 correspond au début d'un travail de thèse intitulé " Comparaison et fusion de segmentations d'images aériennes multidates - Application à la détection de changements pour la mise à jour de bases de données géographiques ".

Une importante partie du travail a consisté en la réalisation d'une bibliothèque C++ de gestion de graphes et d'hypergraphes. La structure de graphe est, en effet, un outil central de modélisation à la fois pour l'analyse de scènes en imagerie (segmentation, mise en correspondance) et pour la représentation des données géographiques. De nombreux types de graphes sont utilisés : graphes modélisant le voisinage dans des images (pixellaire ou de régions), graphes de relations entre objets ou concepts. Un graphe, en tant qu'objet abstrait, possède de multiples variantes (orienté ou non, simple ou multi-graphe, attribué ou non...), sans compter sa généralisation en hypergraphes ou ses restrictions possibles (graphes planaires, arbres,...). En terme d'algorithmie, ces différentes variantes ne peuvent pas être implantées de manière unique pour des raisons d'efficacité ou d'occupation mémoire.

Nous avons modélisé et programmé en C++ une interface générique d'hypergraphe qui encapsule l'ensemble de ces modèles. Cette interface a pour but de séparer la couche physique, correspondant à l'implantation effective de chaque graphe, de la couche logique, correspondant aux manipulations communes que l'on peut effectuer sur ces objets. Ainsi, des algorithmes génériques peuvent être implantés indépendamment du modèle physique utilisé pour chaque type de graphe.

Par ailleurs, les graphes géographiques utilisés pour la représentation de l'information géographique ont des exigences particulières liées à leur nature géométrique. En particulier, les requêtes spatiales doivent être particulièrement efficaces. Comme pour l'aspect topologique des graphes, une interface générique pour l'utilisation d'index géométriques a été conçue. À ce jour, seule, l'indexation par Quad Tree a été mise en place qui utilise les classes de Quad Tree développées par Gabrielle Martin. Cette bibliothèque est actuellement utilisée par Jean-Marc Vigliano pour la manipulation des Bases de Données de l'IGN et de graphes extraits de l'image dans le cadre du recalage du réseau routier.

La deuxième partie des recherches a porté sur la segmentation d'images. On s'est particulièrement intéressé à la prise en compte de la couleur. On a abordé le problème de la quantification de la distribution des couleurs d'une image et celui, très lié, de l'influence du système de représentation colorimétrique. Ce point a fait l'objet d'un stage de DEA [BERGIA 99].

On a envisagé le problème de la segmentation sous ses deux aspects, orienté-contours et orienté régions, et également selon des techniques mixtes. Sur l'approche contours, on a repris les techniques de calcul de gradient pour des images couleur de Jugaz et Lattuati et testé leur comportement.

En orienté-région, on s'est intéressé aux méthodes issues de la morphologie mathématique et/ou utilisant des techniques de graphes : lignes de partage des eaux, arbres de poids minimal sur les pixels ou sur un graphe d'adjacence de régions, et pyramides de segmentations qui en dérivent.

On a enfin étudié une approche mixte de la segmentation qui utilise des voisinages adaptatifs, c'est-à-dire des régions d'influence des pixels qui respectent les cartes de contours. Cette optique nous semble particulièrement intéressante pour obtenir des segmentations de bonne qualité géométrique. L'approche s'inspire des méthodes de diffusion anisotropique de Tuan Dang, ou de corrélation sur des vignettes adaptatives de M. Cord, tout en utilisant des techniques relativement différentes. En effet, on réalise des croissances de voisinages selon un principe de complémentarité de deux arborescences de plus courts chemins dans l'image de gradients. Nous avons obtenu des résultats prometteurs pour le lissage d'image respectant les limites, et pour la segmentation.

Cette technique a également été appliquée dans le cadre de la problématique de la classification bâti/végétation. En effet, nous avons repris les recherches d'Olivier Dissard sur le sujet : les mesures d'entropie des directions de gradient réalisées sur des voisinages adaptatifs s'avèrent plus fiables, et les différentes régions parfaitement limitées.

On distingue, également dans la classification, les mesures de régularité faites sur les frontières des régions de celles faite dans l'intérieur ce qui augmente la capacité à discriminer certains cas conflictuels.

Le troisième volet des recherches a porté sur la problématique de comparaison de segmentations. Nous avons approfondi nos modèles d'appariement utilisant des techniques de découpage optimal d'un graphe. En particulier, l'aspect hiérarchique des appariements possibles a été au cœur des recherches : on a proposé une méthode de décision explorant l'arborescence de bas en haut pour dégager le bon appariement entre groupes de régions. Ceci a été appliqué à la problématique de recherche d'une sous-segmentation commune à deux segmentations d'images prises à deux dates différentes, pour dégager des régions globalement invariantes dans l'intervalle de temps. On trouve effectivement un certain nombre d'entités surfaciques constituant une sorte de PGCD des deux images [GUIGUES 99a]. On a également montré que cette technique permet de fiabiliser chacune des deux segmentations par la complémentarité des deux images.

Nous avons commencé à aborder la problématique de l'utilisation conjointe de planches cadastrales et d'images aériennes pour l'extraction du parcellaire. Pour l'instant, seuls ont été abordés les problèmes de remise en géométrie image du cadastre.

Enfin, il convient de mentionner que nous avons continué à travailler, avec J.-M. Viglino, sur l'extraction du réseau routier, en prenant part à quelques développements sur la maquette (en particulier : intégration de la nouvelle bibliothèque de graphes). De manière plus générale, nous nous sommes impliqués dans le développement du Noyau commun de programmation du laboratoire, ce qui représente un certain investissement pour tous ceux qui y participent.

Référence

[BERGIA 99] Y. Bergia : *Outils pour la segmentation d'images couleurs*, rapport de stage de DEA, laboratoire MATIS, IGN-SR 990035/C-STA, 1999.

Publications

[GUIGUES 99a] L. Guigues : *Comparison of image segmentations using a hierarchical model for n-m regions matchings*, in Proceedings of 2nd IAPR-TC 15 Workshop on Graph-Based Representations (GBR'99), Haindorf, Austria, laboratoire MATIS, IGN-SR 990036/C-COM, 1999.

[GUIGUES 99b] L. Guigues : *A light propagation principle for parallel curves detection*, laboratoire MATIS, IGN-SR 990037/C-COM, 1999.

C.1.13 Extraction et interprétation des courbes de niveau sur carte scannée

François Dupont

Deux axes principaux ont été abordés.

Interprétation des courbes de niveau issues d'une carte papier guidée par un MNT satellitaire

Le premier point a été abordé comme étant la généralisation de la méthodologie développée au cours de la deuxième année concernant l'interprétation guidée par la BDZ des courbes de niveau issues des cartes IGN au 1 : 25 000. Le contexte est ici beaucoup plus délicat, car les courbes extraites d'une carte papier sont souvent interrompues et très bruitées. Les programmes ont été développés et les premiers tests ont été réalisés.

Ils semblent valider notre méthodologie d'interprétation des courbes, mais mettent en évidence un problème d'analyse bas niveau. Les outils que nous utilisons jusqu'ici pour l'extraction des courbes de niveau, basés sur une classification des couleurs, ne sont pas bien adaptés au cas où la carte est fortement estompée.

Le résultat de l'extraction des courbes de niveau sur de telles images est donc très bruité, ce qui perturbe grandement leur interprétation proprement dite. Il semble qu'une solution serait de segmenter la carte, afin d'effectuer l'analyse colorimétrique séparément sur les zones non-estompées, les zones contenant de l'estompage sur fond clair, et les zones contenant de l'estompage sur fond sombre.

Interprétation des courbes de niveau issues d'une carte papier sans utilisation de données externes

Le second point a été abordé en reprenant les programmes décrits ci-dessus, mais en utilisant un MNT issu d'une première analyse " grossière " de la carte pour guider l'interprétation des courbes de niveau, plutôt qu'un MNT satellitaire.

Ce MNT grossier, que nous appelons MNT intermédiaire, est construit à partir des informations suivantes : points de cotes extraits de la carte scannée, et courbes maîtresses reconstruites et cotées.

Nous utilisons la méthodologie de bicoloration mise à point au cours de la première année de thèse pour reconstruire les courbes maîtresses. La précision du MNT intermédiaire pouvant être assez médiocre, une stratégie de bouclage a dû être implémentée.

La qualité des résultats dépend fortement de la précision du MNT intermédiaire, et donc du type de la zone à traiter. Lorsque les points de cotes et/ou les courbes maîtresses sont représentées de manière suffisamment dense, les résultats sont bons, mais si ce n'est pas le cas, ils se dégradent rapidement. Notons que ce travail a fait l'objet de deux publications dans les conférences ICDAR'99 et GREC'99.

Christian Thom (responsable du thème Instrumentation)

C.2.1 Développements de caméras aériennes numériques

Christian Thom

Contexte

L'acquisition d'images directement numériques est en synergie complète avec l'évolution générale de la cartographie à l'IGN. Le passage au tout numérique est rendu nécessaire par l'urgence de la réalisation, puis de la mise à jour des bases de données géographiques, et donc de la mise au point de méthodes d'aide automatique à la restitution.

On constate de plus une constante augmentation de la demande d'ortho-images, notamment en couleur pour la BD ORTHO. L'arrivée annoncée d'images satellitales à résolution métrique devrait encore accélérer les besoins en imagerie numérique aéroportée, en l'orientant vers les plus grandes échelles. Les principaux fabricants de chambres de prise de vues aériennes préparent la mise sur le marché de caméras numériques pour 2000-2001.

On peut prévoir aussi que le développement de l'Internet permettra au grand public de consulter directement des images aériennes numériques, et donc en promouvra la vente.

Objectifs

- Réalisation d'une caméra numérique s'intégrant à une chaîne de production photogrammétrique tout numérique.
- Éveil de l'intérêt des constructeurs de caméras traditionnelles, pour obtenir, à terme, des caméras numériques "industrielles". Ce point est d'ores et déjà atteint.
- Comparaison des images numériques et des images digitalisées, réalisées sur une même zone.
- Réalisation de missions aériennes pour étudier les possibilités et les limitations de la prise de vue aérienne avec un capteur d'image numérique.
- Fourniture d'images directement numériques à la chaîne de production tout numérique.
- Fourniture d'images directement numériques au laboratoire MATIS pour exploitation par des traitements automatisés.
- Production rapide et moins onéreuse d'orthophotos.

Activités - résultats

Comme prévu l'an passé, nous avons continué sur les différents axes engagés en 1998. Le programme de recherche a de nouveau subi un important bouleversement avec la prise de vue Ile de France 1999, qui a été réalisée en numérique avec doublage en analogique. La partie numérique a été réalisée avec une caméra couleur 3k x 2k (cf. *infra*). Cette mission a été marquée par le passage, entre les mains du personnel naviguant de Creil, de la maîtrise d'œuvre de la caméra en vol.

Les personnes du Service des Activités Aériennes (SAA) se sont montrées motivées et nous ont fait part de certaines remarques visant à rendre le logiciel de pilotage de la caméra plus "aéronautique". Nous ne pouvons toutefois que regretter que la partie pré-traitement des données se soit déroulée au laboratoire OEMI, sans aucune formation d'une personne extérieure au laboratoire.

De nombreuses interventions en public nous ont amenées à présenter le projet "caméra numérique" au sein ou à l'extérieur de l'IGN, et notamment au séminaire d'automne des commerciaux de l'IGN.

Nous avons entamé la construction d'une première série de caméras permettant de laisser une caméra à Creil, tout en continuant à développer au laboratoire OEMI. En prévision de la réalisation prochaine d'une caméra multi-canaux nous avons commencé à tester différents filtres infrarouges. Une caméra 4k x 4k sensible uniquement dans le canal proche infrarouge a été mise au point et a effectué un vol-test sur le bassin d'Arcachon pour le compte du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (cf. *infra*). Un nouvel élan pour la télédétection, qu'il ne faudra pas négliger, semble se dessiner.

Outre le BRGM, d'autres organismes semblent intéressés à tisser avec nous des relations de sous-traitance, voire de partenariat, qui seront étudiées dans l'année à venir. Le CNES, en particulier, semble intéressé par la future caméra multi-canaux. Les contacts avec Zeiss/Intergraph ont cette fois abouti sur un accord de coopération en vue du développement de leur caméra.

La mission réalisée sur Saumur, l'an passé, a montré la nécessité d'utiliser un capteur muni d'un dispositif anti-éblouissement pour les missions urbaines, la plupart des villes étant construites au bord de cours d'eau donnant des réflexions spéculaires, dès que le soleil est assez haut. Nous avons donc pris contact avec Kodak afin de faire développer des capteurs 4k x 4k muni de tels dispositifs. Un marché est sur le point d'être conclu. Ces capteurs équiperont la future caméra multi-canaux et seront certainement disponibles avant fin 2000.

Beaucoup de l'activité du laboratoire OEMI est restée tournée vers des tâches de " production ", liées à la mission Ile-de-France, si bien que la mission prévue sur Amiens commandée par le laboratoire MATIS, n'a pu avoir lieu que début octobre 1999.

Travaux sur et autour de la caméra

Nous avons agrandi notre gamme d'objectifs munis d'obturateurs rapides de chez ROLLEI : nous possédons aujourd'hui un 30 mm, deux 40 mm, trois 50 mm et un 80 mm. La multiplicité de certaines focales s'explique par la prochaine réalisation d'une caméra multi-canaux (Rouge, Vert, Bleu et proche IR). Les premiers tests effectués sur le canal proche IR sont très intéressants et ont permis de se rendre compte de la défocalisation de ce canal par rapport au visible et de la différence de courbure des rayons lumineux. Nous avons ainsi constaté que les filtres utilisés jusqu'ici devant les capteurs noir et blanc Kodak, pour couper l'IR, n'étaient pas assez raides et autorisaient ainsi quelques " fuites ", provoquant un flou dans les coins. Un nouveau filtre a été commandé et sera prochainement testé.

Concernant la caméra multi-canaux, nous nous sommes dotés de trois nouveaux racks informatiques qui s'ajouteront à l'un des deux systèmes déjà au laboratoire. Pour la partie électronique, trois électroniques identiques et destinées à recevoir, dans un premier temps, des capteurs 3k x 2k ont été réalisées et seront testées dans les semaines à venir. La partie logicielle est en cours de conception et induira sans aucun doute de profonds changements dans la gestion du système.

Nous avons testé, avec succès, les logiciels et la nouvelle carte rendus nécessaires par l'obsolescence de l'ancien micro-contrôleur malgré un dysfonctionnement quasi immédiat du système de développement pour MC68HC11, qui avait été acheté.

À l'occasion de la mission sur l'Ile-de-France, plusieurs modifications ont été apportées à la partie logicielle du système. La gestion des disques a été améliorée et permet un changement de partitions automatique sur deux disques pour faire face à des axes de vol dépassant parfois les deux cents images. D'autre part, les données GPS de l'avion arrivent en entrée sur le rack via une liaison série, ce qui permet, d'une part, de régler automatiquement les paramètres vitesse de l'avion et hauteur de vol et, d'autre part, de donner une position approximative du sommet de prise de vue dans l'en-tête de chaque image.

Toujours à l'occasion de la mission Ile-de-France, nous avons constaté que plus le pixel-sol en couleur devient gros (50 cm et 1 m), plus les artefacts dus à la structure du capteur deviennent nombreux et gênants. Les logiciels de traitement bas niveau des images couleur, en particulier pour la partie sur-échantillonnage, vont donc être prochainement améliorés.

La plate-forme stabilisée adaptée à la masse de la caméra a effectué le vol sur Amiens (cf. *infra*). Le réglage du tangage pose un problème, dû au gyromètre utilisé. Ce dispositif sera remplacé par un système développé au laboratoire basé sur l'usage de gyromètres laser à fibres optiques.

Un système informatique de bureau, analogue aux systèmes embarqués et permettant de lire les disques enregistrés en vol est prêt à être installé au SAA. Il sera un maillon de la chaîne de traitement qui sera installée à Creil d'ici au printemps prochain (reprise des missions aériennes).

Des contacts ont été pris avec les Travaux Spéciaux de Géodésie pour réaliser un nouveau polygone de calibration géométrique sur le site de Saint-Mandé. Nous attendons de mieux connaître la gamme de focales que nous utiliserons avant de prendre la décision d'implanter les mires.

La plupart de ces travaux devaient initialement faire l'objet d'un développement. Celui-ci n'ayant jamais été officialisé, ces activités ont continué à relever de la recherche.

Missions aériennes

Du mois de mai au mois de septembre 1999, une caméra équipée du capteur couleur Kodak 3k x 2k a effectué les vols de la prise de vue Ile-de-France. Deux couvertures aériennes ont été effectuées : un pixel-sol d'un mètre sur

l'ensemble de la région Ile-de-France (12 000 km² : 8 125 images) et un pixel-sol de 50 cm, sur les parties les plus urbaines (4 000 km² : 14 000 images).

Tous les tableaux d'assemblage n'ont pas encore été faits, mais il semble à l'heure actuelle, que cette mission soit réussie. Nous avons ainsi pu penser à ce que sera la ligne d'exploitation installée à Creil, l'an prochain. Au cours de la mission, différents problèmes sont survenus et ont été aussitôt résolus au laboratoire OEMI. D'autre part, le nombre élevé de jours de vol nous offre une grande diversité de conditions de visibilité allant du temps clair au plafond de cirrus à certains endroits.

Des contacts ont été pris en cours d'année avec des personnes du BRGM désireuses d'étudier l'évolution du littoral et en particulier du bassin d'Arcachon. Le 6 octobre 1999, une caméra Noir et Blanc 4k x 4k, munie d'un objectif 50 mm et d'un filtre coupant le visible et ne laissant passer que le proche IR a acquis cinquante-quatre images environ, au pixel-sol de 80 cm, sur la partie nord du bassin. Elles se décomposent en trois axes identiques pris à des instants différents de la marée montante afin de faire la micro-topographie du rivage. Cette mission a montré la faisabilité de la chose et sera normalement complétée l'an prochain par une mission de la caméra multi-canaux dans le visible.

Le 13 octobre 1999, une prise de vue panchromatique a été réalisée sur Amiens, simultanément avec une chambre traditionnelle. Une centaine d'images à 20 cm de pixel-sol formant un bloc de quatre axes en multi-stéréo (recouvrement de 60% x 60%) vont être exploitées par le laboratoire MATIS. Des survols successifs de la même zone à des altitudes croissantes ont ensuite permis d'acquérir des images à un pixel-sol d'environ 40, 60, 80 cm et 1 m.

Ces images seront à la base d'une étude visant à comparer, d'une part, les images numériques et les images numérisées et ainsi à éclaircir le problème de l'échelle équivalente entre une prise de vue numérique et une traditionnelle, d'autre part, les images numériques entre elles, à savoir : les limites et les possibilités liées à chaque taille de pixel-sol.

Exploitation des missions aériennes des années précédentes

La mission du Mans de 1997 continue à être exploitée par le laboratoire MATIS dans le cadre de l'extraction du bâti. Elle sert aussi de banc d'étude pour les essais concernant l'aérotiangulation.

La mission sur Rennes en couleur, l'orthophoto ayant été livrée au client, est aussi toujours utilisée dans le cadre des études du laboratoire MATIS concernant la modélisation radiométrique, et le mosaïquage automatique.

La mission sur Saumur a finalement été exploitée, en partie, dans une chaîne de production numérique. Le mauvais rapport base sur hauteur de la prise de vue n'a pas permis d'atteindre une précision suffisante sur le z. Même en utilisant les couples formés en sautant une image, ce que permettait cette mission grâce à son recouvrement longitudinal de 70%, le résultat n'est pas suffisant. Il faudra donc s'orienter vers l'usage d'optiques à plus courte focale.

Relations avec les industriels

Comme nous l'avons dit, les contacts avec Zeiss sont désormais solides au sein d'une collaboration et d'une mise en commun de savoir-faire. Nous devrions bientôt recevoir, de leur part, des filtres colorés Rouge, Vert et Bleu, afin d'avancer dans la conception de la caméra multi-canaux.

Suite

Les différents axes engagés en 1999 seront poursuivis en 2000. Comme nous l'avons dit, nous possédons désormais les images qui devraient permettre de déterminer la taille de pixel-sol nécessaire à telle ou telle application, et de comparer les différentes tailles de pixel-sol avec différents pas de numérisation, appliqués aux clichés argentiques réalisés. Un important travail va être consacré à la réalisation du prototype de caméra multi-canaux en adéquation avec les différents besoins d'utilisateurs, tant à l'IGN qu'en dehors de l'Institut. Des tests seront aussi réalisés avec le prototype de la caméra de Z/I Imaging.

Publications

[SOUCHON, THOM 99] J.-Ph. Souchon & Ch. Thom : *Apport de nouvelles technologies dans l'acquisition des données topographiques : les caméras numériques de l'IGN*, in Revue XYZ, n° 78, 1^{er} trimestre 1999, pp. 24-30, laboratoire MATIS, IGN-SR 99005/L-ART, 1999.

[THOM, SOUCHON 99] Ch. Thom & J.-Ph. Souchon : *The IGN digital camera system in progress*, Photogrammetric Week '99, pp. 89-94, Fritsch/Spiller Eds, laboratoire MATIS, IGN-SR 99006/C-COM, 1999.

C.2.2 Essais aéroportés du télémètre laser aéroporté

Olivier Bock

Principe et objectifs du TAMS

Le télémètre laser aéroporté, à champ large, pour la surveillance des mouvements verticaux du sol (TAMS), est un instrument en développement à l'IGN, en collaboration avec l'ESGT et Elf Aquitaine. Il s'intègre dans une nouvelle

méthode de géodésie destinée à la mesure des déformations verticales du sol apparaissant dans des zones d'extraction de fluides (pétrole, gaz) ou de solides (minerais), où les phénomènes de subsidence sont symptomatiques de variations de contraintes dans le sous-sol.

L'objectif est la mesure d'altitudes relatives d'une centaine de repères répartis sur une surface d'environ $10 \times 10 \text{ km}^2$, avec une précision de un millimètre, au bout d'une heure d'observation. Notons qu'à l'heure actuelle, aucune méthode de géodésie, tant classique (nivellement, triangulation, etc.) que moderne (GPS, DORIS, SAR, etc.), ne permet de combiner le niveau de précision recherché avec les contraintes temporelles et spatiales indiquées.

Le principe du TAMS consiste à utiliser un faisceau laser fortement divergent (d'où l'appellation "champ large") qui produit au sol une empreinte de grand diamètre. Ceci permet d'effectuer une mesure de distances simultanées sur cinq à dix cibles placées au sol (rétro-réflecteurs optiques de type "coins de cube"). L'instrumentation est constituée d'un laser impulsionnel dont les échos des réflecteurs sont détectés, numérisés et enregistrés en vol.

Un traitement numérique (déconvolution) de ce signal permet d'estimer précisément l'instant d'arrivée des impulsions. Connaissant l'instant d'émission des impulsions laser, les positions approchées de l'avion (mesurées par GPS en mode trajectographique) et des réflecteurs au sol (mesurées par GPS en mode cinématique, une fois pour toutes), on en déduit la distance géométrique (corrigée de l'effet de l'atmosphère). L'ensemble de ces distances est ensuite utilisé pour résoudre le problème inverse (multilatération), c'est-à-dire l'estimation précise des positions relatives des cibles entre elles. L'avantage de cette technique à champ large est qu'elle permet également d'ajuster la position de l'avion à partir des mesures et ne nécessite donc pas de système de navigation précis.

Travaux méthodologiques effectués

L'objectif initial et le cahier des charges ont été définis en collaboration avec Elf Aquitaine, en 1990. Le principe de l'instrument (laser à champ large) a été imaginé au laboratoire OEMI de l'IGN et un brevet a été déposé en 1990 [IGN 90]. Une première étude par simulations numériques a ensuite permis d'évaluer les contraintes de mise en œuvre et les performances attendues sur la détermination des altitudes relatives [BELLIER 92].

Une étude plus détaillée des sources d'erreurs (instrument, météo, méthodes numériques) a ensuite été réalisée [BOCK 96]. Un prototype d'instrument a été développé, testé en laboratoire, et déployé à bord d'une camionnette pour deux campagnes de mesures (Saint-Étienne de Tinée, août 1995), (Combs-la-Ville, décembre 1995) [BOCK 95]. Dans cette dernière, une précision radiale de 1-2 mm a été obtenue, ce qui a permis de valider la modélisation du système et les méthodes numériques [BOCK 96] [BOCK 98a] [BOCK 99a].

À partir des modèles validés par ces expérimentations terrestres, des simulations numériques ont été menées pour extrapoler ces résultats à une configuration aérienne [BOCK 99b]. Il a été montré que les performances ultimes de la technique dépendaient essentiellement du bilan de liaison de l'instrument, du nombre de mesures et de la taille du réseau ; des paramètres tels que l'altitude de l'avion, la divergence du faisceau et la densité de cibles au sol n'agissant qu'au second ordre. L'étude des effets atmosphériques a montré que les inhomogénéités de température à méso-échelle (gradients horizontaux non uniformes) pouvaient induire des erreurs systématiques de l'ordre de 0,5 mm. Par ailleurs, la scintillation due à la turbulence atmosphérique et un couvert nuageux partiel n'avaient qu'un effet marginal sur la précision finale [BOCK 99b]. Cette méthodologie de simulation numérique a été utilisée pour la préparation de la campagne aérienne ARAT 1998.

Préparation et réalisation de la campagne ARAT 1998

L'objectif de cette expérience était de tester une instrumentation modifiée pour des conditions aéroportées (en particulier, le laser et l'étage de détection du signal), d'évaluer les effets atmosphériques et les modèles d'erreurs sur la performance finale de la méthode. L'ambition en terme de précision de positionnement était relativement modeste pour cette expérience, sachant que l'instrumentation n'était pas encore aussi performante que souhaitée par les simulations de principe évoquées plus haut [BOCK 99b].

Le laser employé pour cette campagne (financé par l'ESGT) a été développé par BMI (France) pour fonctionner dans des conditions aéroportées. Ce laser est plus puissant que le modèle employé pour les expériences terrestres précédentes (laser de la station laser ultra-mobile de l'Observatoire de la Côte d'Azur). L'étage de détection a été développé au laboratoire OEMI de l'IGN. La solution retenue devait être adaptée aux conditions d'expérimentations sur le terrain. En particulier, nous avons minimisé le temps de réponse du système afin de pouvoir mieux détecter des échos proches. Ceci était au détriment de la précision finale (le gain diminuant avec le temps de réponse), mais devait permettre de tester le principe des mesures simultanées de distances et d'ajustement de positions de l'avion et des cibles [BOCK 98b].

Initialement, l'expérimentation devait se faire en mars 1998, au-dessus de la base aérienne de Creil (Oise), avec un réseau de 6×12 réflecteurs. Malheureusement, le créneau de quinze jours n'a pas suffi pour l'installation, la mise au point du matériel dans l'avion et la réalisation de vols concluants (pannes, grèves du contrôle aérien de Roissy, météo défaillante, etc.).

Nous avons alors pu bénéficier d'un autre créneau, en mai, et en avons profité pour également changer de site et choisir l'ancienne base aérienne de Crucey (Eure), plus commode d'accès au sol et de survol. Une zone d'environ 1 km^2 a été équipée avec un réseau de 8×8 réflecteurs. Deux missions, d'environ quatre heures chacune, ont finalement été réalisées les 13 et 14 mai 1998, produisant environ 6 000 tirs laser utiles. Les mesures ont été réalisées depuis deux altitudes différentes (900 et 1 200 m) et avec plusieurs angles de divergence ($15\text{-}20^\circ$).

Résultats de la campagne ARAT 1998

Le traitement des données de cette campagne a nécessité d'importantes modifications des algorithmes existants pour estimer les instants d'arrivée des échos (déconvolution), détecter les erreurs aberrantes liées à la superposition des échos et prendre en compte de nouveaux modèles d'erreurs. Après de nombreuses évaluations, par simulations numériques, nous avons trouvé une paramétrisation optimale des algorithmes. Nous sommes ainsi arrivés à une précision de positionnement de 2 cm sur la différence des altitudes calculées pour les deux jours de mesures [BOCK 99c] [BOCK 99d]. Cette précision est compatible avec une analyse de covariance *a posteriori* (distribution gaussienne, centrée, de 2 cm d'écart-type).

Toutefois, la précision du TAMS est actuellement encore limitée par plusieurs facteurs. Le plus important est la précision en monocoup sur la mesure de distance. Celle-ci était d'environ cinq à six centimètres, en moyenne, dans cette expérience. Afin de l'améliorer, nous prévoyons de poursuivre les travaux au laboratoire OEMI sur l'emploi de photodétecteurs avec gain interne (photodiode à avalanche ou photomultiplicateur multicanaux). Ainsi, un facteur 10 pourrait être gagné au niveau du gain, mais avec probablement une réduction du temps de réponse. L'utilisation d'une optique collectrice à grand champ devrait également permettre de gagner un facteur 3 à 4.

Dans la campagne ARAT-1998, deux autres facteurs limitant sont apparus : d'une part, le resserrement des cibles au sol (environ 150 m), lié à la petite taille du réseau et au choix de l'implantation d'un réseau avec une densité de cibles représentative des conditions réelles. D'autre part, le décalage d'environ dix mètres entre l'antenne GPS (au niveau du cockpit) et le point d'émission du laser (trappe arrière). Des simulations ont montré que lors des phases d'accélération/décélération de l'avion, la trajectoire du point d'émission pouvait s'écarter de sa position supposée d'environ un mètre (en X, Y et Z). Cet effet a été compensé par une incertitude a priori plus élevée, qui a réduit la précision théorique d'environ 20 %.

L'effet de ces deux facteurs limitants a eu une influence plus importante sur la méthode de déconvolution que sur la méthode de multilatération. En effet, la première ne s'est avérée robuste qu'au moyen d'une détection sévère des erreurs aberrantes. Du coup, le bénéfice attendu de réduction du temps de réponse du système n'a pas été sensible. Ceci nous encourage donc plutôt à favoriser un gain important à un temps de réponse faible pour les expériences futures. Il est préférable également de rapprocher au maximum le point d'émission laser de l'antenne GPS, ceci pour éviter le recours à une mesure d'attitude de l'avion par gyroscopes.

En conclusion, des résultats encourageants ont été obtenus avec la campagne ARAT 1998. D'un point de vue instrumental, nous avons démontré la possibilité de faire fonctionner un laser à modes bloqués en avion. D'un point de vue de la méthode, nous avons obtenu une précision altimétrique comparable aux techniques de géodésie modernes (par exemple, GPS).

Ceci démontre donc :

- que nous disposons d'une instrumentation fidèle au modèle d'erreur,
- que les méthodes de déconvolution du signal et de détection des erreurs aberrantes sont robustes,
- que les modèles d'erreurs sur les paramètres a priori sont corrects.

Toutefois, des développements instrumentaux doivent être poursuivis, pour pouvoir atteindre la performance ultime de cette technique (précision altimétrique d'environ un millimètre). Une seconde campagne aérienne sera alors nécessaire pour l'évaluation des effets atmosphériques et la validation finale.

Publications

[BELLIER, KASSER 92] O. Bellier & M. Kasser : *Expérimentation de deux instrumentations de télémétrie laser, l'une aéroportée et l'autre satellisée, pour la mesure rapide de déformations verticales. Résultats préliminaires des simulations*, projet de recherche IGN - SNEA(P) n° 7862, rapport final de la phase 1, laboratoire OEMI, IGN-SR 920004/L-COM, septembre 1992.

[BOCK et al 95] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser, and D. Fourmaintraux : *Development of a new airborne laser subsidence measurement system, aiming at mm-accuracy*, in Proceedings of the 5th International Symposium on Land Subsidence, F.B.J. Barends, F.J.J. Brouwer, F.H. Schröder, ed. (Balkema, Rotterdam, 1995), pp. 113–122, laboratoire OEMI, IGN-SR 950001/L-COM, 1995.

[BOCK 96] O. Bock : *Étude et réalisation d'un télémètre laser aéroporté en champ large sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol. Étude de l'adaptation du système à un véhicule satellitaire*, thèse de Doctorat, Université Paris-7, 1996, laboratoire OEMI, IGN-SR 960004/L-THE, 1996.

[BOCK 97] O. Bock, M. Kasser, and Ch. Thom : *A wide-angle airborne laser ranging system for millimeter accuracy subsidence measurements*, in Proceedings of the EOS Topical Meeting on Optoelectronic Distance / Displacement Measurements and Applications, Nantes (F), 1997, laboratoire OEMI, IGN-SR 970006/L-COM, 1997.

[BOCK 98a] O. Bock, M. Kasser, Ch. Thom, and J. Pelon : *Study of a wide angle laser ranging system for relative positioning of ground-based benchmarks with millimeter accuracy*, in Journal of Geodesy, vol. 72, n° 7/8, pp. 442–459, July/August 1998, laboratoire OEMI, IGN-SR 980003/L-ART, 1998.

[BOCK 98b] O. Bock, M. Kasser, and Ch. Thom : *First aircraft experiment with the WA-ALRS*, in Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 21-25 septembre 1998, Deggendorf (D), laboratoire OEMI, IGN-SR 980004/L-COM, 1998.

[BOCK 99a] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser, and J. Pelon : *Multilateration with the wide angle laser ranging system: ranging performance and first ground-based validation experiment*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, n° 2, pp. 739-747, March 1999, laboratoire OEMI, IGN-SR 990001/L-ART, 1999.

[BOCK 99b] O. Bock : *Multilateration with the wide-angle airborne laser ranging system: positioning precision and atmospheric effects*, in Applied Optics, vol. 38, n° 15, 20 May 1999, laboratoire OEMI, IGN-SR 990002/L-ART, 1999.

[BOCK 99c] O. Bock : *First aircraft experiment results with the wide-angle airborne laser ranging system*, in Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Techniques, EOS/SPIE symposium on Remote Sensing, Florence (Italie), 20-24 septembre 1999, laboratoire OEMI, IGN-SR 990007/L-COM, 1999.

[BOCK 99d] O. Bock : *Results of the first aircraft experiment with the wide-angle airborne laser ranging system*, soumis pour publication dans The European Physical Journal, Applied Physics, laboratoire OEMI, IGN-SR 990008/L-COM, 1999.

[IGN 90] *Procédé pour déterminer les coordonnées spatiales de points, application de ce procédé à la topographie de haute précision, système et dispositif optique pour la mise en œuvre de ce procédé*, brevet pour la France n° 90 12609 du 12 octobre 1990, IGN.

C.2.3 Systématismes des prises de vue aériennes et trajectographie

Christian Thom et Thierry Duquesnoy

Contexte

L'utilisation du GPS dans la réalisation des aérotriangulations peut apporter des éléments nouveaux à ce dossier. En fixant les positions des centres de projection, on contraint évidemment bien plus fortement les modèles, et donc les systématismes.

La précision " absolue " du GPS en mode trajectographique restant pour l'instant insuffisante, il faudra tenter de l'améliorer, par exemple, en utilisant les orbites recalculées par l'IGS et non les orbites radiodiffusées comme actuellement dans le logiciel de trajectographie de la société SERCEL.

De plus, l'arrivée sur le marché de systèmes couplés GPS/Inertiel permettra dans un futur proche de connaître l'orientation externe de la caméra au moment de la prise de vue. Le seul obstacle sur la voie de la restitution sans aérotriangulation et sans stéréopréparation sera donc la présence des systématismes qui sont l'objet de cette étude.

Objectifs

Amélioration de la trajectographie GPS dans le but d'alléger voire de supprimer la stéréopréparation.

Activités - résultats

Fin 1998, la société Sercel nous a prêté du matériel pour tester leur système de résolution d'ambiguïté en vol, en particulier, pour connaître à quelle distance maximale la station de référence doit se trouver de l'avion pour pouvoir résoudre les ambiguïtés dans un laps de temps raisonnable. Le récepteur embarqué à bord de l'avion sert d'aide à la navigation et d'enregistrement des données brutes nécessaires au calcul de la trajectoire. Il doit de plus permettre d'enregistrer des tops correspondant au moment de prises de vues. La fréquence des données nécessaires à un calcul de trajectoire est de l'ordre du hertz.

Les premiers tests effectués au sol avec le récepteur ont montré que ce dernier avait un problème pour absorber le flux de données à une telle fréquence et que deux tops au lieu d'un étaient générés de manière aléatoire. Ces deux problèmes ont aujourd'hui disparu grâce à la diligence de la société Sercel. Les tests suivants ont pu être effectués dans la troisième semaine d'août qui correspond à la semaine 1025 dans le calendrier GPS, semaine qui, pour le GPS pose des problèmes similaires à ceux du bogue de l'an 2000. Là encore, la société Sercel a su répondre rapidement au problème. Des tests de trajectographie ont alors pu être réalisés en voiture et différents logiciels ont pu être testés sur ces données.

Le système GPS permettant de mesurer l'attitude de l'avion n'a pu encore nous être prêté.

Dans le courant de l'année 1999, sont arrivés sur le marché différents logiciels permettant des traitements de trajectographie et de cinématique. Une ancienne trajectographie obtenue avec le logiciel SERCEL a été retraitée avec un autre logiciel (GrafNav), et les résultats vont être comparés prochainement.

En parallèle, un système Racal de réception des corrections différentielles envoyées depuis un satellite géostationnaire a été acquis par l'IGN, et installé dans l'avion servant aux prises de vue de la caméra numérique. La navigation devrait en être facilitée, par la connaissance de la position métrique de l'avion. Les tests se sont avérés concluants dans la mesure où on obtient une dispersion des données effectivement métrique.

Enfin, des études sont menées en ce moment au laboratoire MATIS pour déterminer si l'utilisation des systèmes GPS/Inertiel, très coûteux, est réellement nécessaire pour éviter la stéréopréparation, et si la connaissance du seul GPS ne pourrait pas suffire dans la plupart des cas, si l'on dispose d'une bonne chaîne de traitement automatique pour l'extraction des points de liaison, et l'aérotriangulation.

C.3.1 Appariement de données géographiques

Cécile Lemarié

Contexte

L'appariement de données géographiques est une technique complexe consistant à identifier, dans des jeux de données différents, les entités représentant les mêmes phénomènes du monde réel. Ce processus est difficile à mettre en place, car il fait intervenir un nombre important de techniques et de paramètres qui dépendent fortement de la modélisation de l'information géographique et impliquent également la maîtrise d'aspects cognitifs.

Cependant, l'utilisation de ce type d'outils permettrait, d'une part, de réutiliser de façon optimale des jeux de données déjà existants (intégration de jeux de données de sources diverses, raccordement de jeux de données adjacents), et, d'autre part, d'optimiser la gestion des jeux de données (contrôle qualité, propagation de mises à jour entre bases de données).

Jusqu'à présent les travaux sur l'appariement avaient consisté à définir selon les jeux de données à apparier les algorithmes à utiliser. Ils ont abouti à une boîte à outils d'algorithmes. Les travaux menés cette année se sont orientés sur l'aspect processus et s'intéressent à la définition du mécanisme à adopter afin de se doter d'un outil capable d'effectuer lui-même les bons choix d'algorithmes selon les données à traiter.

Objectifs

Les objectifs de l'action de recherche sont de :

- définir la structure d'un module générique d'appariement de données géographiques,
- mettre au point une application-test permettant de valider les spécifications du module générique d'appariement.

Travaux réalisés

Les travaux sur l'appariement ont été réalisés dans le cadre de la thèse sur l'appariement générique entre bases de données géographiques, qui a débuté en octobre 1998.

Un état de l'art sur les algorithmes d'appariement (sémantiques, géométriques, topologiques) et leurs domaines d'utilisation (expériences réalisées) a été effectué. Cette étude nous a permis de réaliser une modélisation des objectifs de l'appariement à l'aide du formalisme UML en spécifiant les besoins sous forme d'un diagramme de cas d'utilisation et ainsi obtenir une vue globale du problème.

À partir de ce diagramme, un premier module générique d'appariement basé sur une analyse préalable des besoins et du contexte géographique de l'application qui fait appel à un processus d'appariement, a été proposé.

Le processus a été décomposé en deux niveaux :

- un niveau global constitué par l'analyse préalable qui détermine la stratégie globale que le processus doit adopter pour apparier les bases de données géographiques. Elle est réalisée pour exprimer le contexte et le but de cet appariement sous forme de connaissances et utilise une base de connaissances,
- un niveau local qui réalise effectivement les liens d'appariement et fait appel à de nombreux algorithmes. Nous avons constaté que le passage d'une étape à une autre ou tout simplement la validation d'une étape dépendait d'un ensemble de contraintes à satisfaire, ce qui a orienté notre recherche vers les problèmes à satisfaction de contraintes. L'idée est l'exploitation des méthodes utilisées dans les systèmes à base de contraintes (*backtrack*, *backtrack* avec prospection en avant, mémorisation de conflit...) dans un processus générique d'appariement.

Un diagramme de classes relatif au module générique d'appariement est en cours de définition sous le SGBD O2.

Suite

L'action de recherche " Appariement de données géographiques " se termine au 31 décembre 1999. Cependant, les travaux sur l'appariement se poursuivront dans le cadre des deux nouvelles actions de recherche " Unification des bases de données " et " Gestion des évolutions dans les BDG " et porteront sur l'implémentation du modèle à satisfaction de contraintes.

Suite

L'année 2000 verra se prolonger les différents tests avec les récepteurs Sercel. En particulier les premiers vols d'essai devraient avoir lieu dans le courant du premier trimestre. Ces tests devraient permettre de valider à la fois les récepteurs d'acquisition et les logiciels de traitement. Il n'est pas exclu que l'on puisse aussi tester des systèmes inertiels afin de connaître l'attitude de l'avion.

Publications

[BADARD 99] Th. Badard : *On the automatic retrieval of updates in geographic databases based on geographic data matching tools*, in Proceedings of the 19th International cartographic Conference, Ottawa (Canada), pp. 47-56, laboratoire COGIT, IGN-SR 990002/S-COM, 1999.

[BADARD, LEMARIÉ 99] Th. Badard and C. Lemarié : *Propagating updates between geographic databases with different scales*, to be published in Innovations in GIS VII : geocomputation. P. Atkinson and D. Martin Editors, Taylor and Francis, laboratoire COGIT, IGN-SR 990034/S-ART, 1999.

C.3.2 Qualité des bases de données géographiques

François Vauglin

Bilan global de la recherche sur la qualité

Cette Action de recherche avait, dans son ultime forme, l'objectif central suivant : *évaluer la pertinence des métadonnées sur la qualité* des données géographiques vectorielles. Des études adjacentes à cette problématique ont été conduites parallèlement, en particulier sur la qualité des données surfaciques et sur les problèmes de simulation et de résolution. Un bilan plus détaillé de l'année 1999 est donné au chapitre suivant (" Activités 1999 ").

Ces travaux se sont inscrits dans la continuité des recherches sur la qualité des données géographiques vectorielles, conduites au laboratoire COGIT depuis de nombreuses années, avec des moyens humains restreints. Un bref historique de ces travaux est retracé ici.

Depuis que l'IGN a opéré sa mutation technologique pour passer aux bases de données numériques, un consensus informel s'est formé sur une base minimale de critères permettant de décrire la qualité des données géographiques : généalogie, sémantique, géométrie, cohérence, temporel.

Ce consensus est issu de la recherche américaine menée entre la fin des années 70 et la fin des années 80 (~ 1975-1990). Loin de résoudre simplement le problème de l'évaluation de la qualité, ces critères soulèvent eux-mêmes de nombreuses questions quant à la façon de les *définir*, de les *mesurer*, et de les *utiliser*.

Première phase : 1992-1997

Le laboratoire COGIT a lancé sa première action de recherche sur les données vectorielles en 1992 avec le début de thèse de Philippe Rigaux sur la qualité géométrique, puis l'étude bibliographique de Lary Bender (Université de Washington) sur l'état de la recherche sur la qualité. Nicolas Stricher et Philippe Josse ont enchaîné deux études sur l'appariement et le regroupement, étapes constitutives de la superposition. C'est dans ce contexte qu'a été lancée ma thèse sur des modélisations de précision géométrique.

Elle a été accompagnée de plusieurs stages : Pascal Fasquel sur la formalisation d'un modèle informatique des bandes ε , implémenté par Guy-Alain Amoussou, Ibrahim Zéroual sur l'état de l'art sur l'appariement et la qualité, Khalid Yousofi sur l'implémentation de mesures d'écarts géométriques linéaires, Arnaud de la Losa, Aurélie Bouillon et François Dubreuil sur les variogrammes des champs d'incertitudes des objets linéaires, Benoît Ravel sur la propagation des modèles de qualité des incertitudes géométriques.

Le travail a consisté essentiellement à chercher des mesures suffisamment génériques pour évaluer la qualité, à les tester, à modéliser leur comportement selon des critères géographiques (incertitudes absolues ou relatives), à étudier l'impact des modèles géométriques courants (polylignes et polygones) sur la qualité géométrique des données, et à commencer à étudier les comportements dans des applications.

Au-delà des résultats quantitatifs, les études sur la géométrie ont permis d'acquérir des mesures, des formalismes, et une connaissance fondamentale sur la nature des incertitudes qui entachent les données géographiques.

L'ensemble de ces travaux a mis en valeur de nouvelles problématiques auxquelles, forts de ces expériences, il devenait possible de s'attaquer. Pour l'essentiel : identification de l'appariement comme étant une opération à la fois centrale et transversale, formalisation de la qualité sémantique, définition de nouvelles mesures pour les lignes et les surfaces.

Phase de maturité : 1997-1999

Le travail sur les données géométriques linéaires se devait d'être étendu aux données surfaciques. Tel fut l'objet du stage de DEA d'Atef Bel Hadj Ali sur l'appariement géométrique des objets surfaciques et des mesures d'écarts de forme et position entre objets surfaciques. L'auteur a poursuivi ces travaux dans la première année d'une thèse sur les objets surfaciques.

La formalisation de la qualité géométrique est une chose *a priori* relativement aisée puisque les grandeurs concernées sont des coordonnées, entités mathématiques. Ce n'est donc, qu'en second temps, qu'il fut possible de s'attaquer à la formalisation de la qualité sémantique. La maturité acquise a aussi permis de poser en termes de besoins et d'utilisateurs les problématiques.

Ainsi, le stage de Pierre Couget sur l'étude d'un outil de bruitage sémantique a permis de préparer le travail de thèse d'Olivier Bonin sur la pertinence des indicateurs de qualité sémantique. Ce travail a été accompagné par le stage de Lucie Fouqué sur la simulation d'erreurs réalistes sur les objets linéaires.

À nouveau, la démarche adoptée privilégie la recherche de mesures et de formalisation. Il s'agit de combler une lacune béante dans l'édifice actuel de qualité : on a fait de la qualité pour produire (contrôle et recette), on l'utilise un peu pour vendre, mais on ne sait pas comment l'utiliser avec les données. En clair, comment utiliser une *emq* ou une matrice de confusion pour dire si le site d'implantation d'un hypermarché obtenu par un SIG est digne de confiance ? Il ne s'agissait pas tant de résoudre cette question sur une application donnée, mais plutôt d'apporter une réponse méthodologique à un problème générique.

Enfin, quelques problèmes en suspens ont été abordés : simulations réalistes de bruits dans des données géographiques, problèmes de résolutions et de spécifications dans les bases de données vectorielles sont les principaux.

Bilan

Les travaux du laboratoire COGIT en matière de qualité sont reconnus par la communauté internationale de recherche SIG. En forme de conclusion à ce rapide bilan, nous lançons quelques pistes qui nous semblent potentiellement fructueuses en termes de retombées et " mûres " en termes d'aboutissement de recherches.

- La *propagation des paramètres de qualité* dans les applications reste encore largement à étudier sous l'angle de l'étude de leur hétéroscédasticité : quelle que soit la maîtrise qu'on a de la propagation des indicateurs, ils ne sont utiles que s'ils représentent quelque chose. Or, les sondages utilisés actuellement sont coûteux et ne permettent pas d'obtenir des grandeurs statistiquement représentatives. Cet effet est amplifié par la création de jeux de données issus de sources ou de techniques de plus en plus hétérogènes. L'étude de l'hétéroscédasticité des indicateurs doit permettre de segmenter les jeux en zones statistiquement homogènes, ce qui permettrait de réduire les taux d'échantillonnage, d'obtenir des grandeurs représentatives et de faciliter la propagation des paramètres dans les applications.
- La qualité est décomposée en composantes : géométrie, sémantique, temporel, généalogie, cohérence. Le développement en masse de nouvelles applications a montré une lacune dans cette description : *la topologie*. Elle a jusqu'ici été considérée comme une simple conséquence calculable de la géométrie. Il se trouve qu'elle a une importance bien supérieure à la précision géométrique dans de nombreux cas (navigation embarquée, calculs d'itinéraires, plans de métro, etc.). Il serait utile d'étudier les rapports entre qualité géométrique, sémantique, et topologie. Ce travail nécessitera probablement de définir des indicateurs spécifiques de la qualité topologique.
- Un travail croisant de nombreux concepts et outils techniques et mercatiques, dont certains sont encore à développer, pourrait conduire à donner des *mesures de satisfaction* des utilisateurs.
- Les études menées ont permis de mieux connaître les incertitudes des données géographiques. Elles englobent les imprécisions des appareils de mesure et le flou inhérent à la définition des données géographiques. Si la première composante est relativement bien connue, entre autres, grâce aux travaux des géodésiens, la seconde reste largement inconnue. L'utilisation des notions de *vague* pour décrire l'indéterminisme du terrain nominal permettrait d'envisager de nouveaux modèles ou de nouveaux langages pour manipuler les incertitudes avec plus de pertinence.

Activités 1999

Les cinq critères utilisés pour décrire la qualité des bases de données géographiques sont définis par le producteur : généalogie, actualité, cohérence logique, précision géométrique, précision sémantique. Ils lui permettent d'évaluer l'adéquation du produit aux spécifications. Rien ne permet, en revanche, d'assurer à l'utilisateur l'adéquation du produit à ses besoins propres. La thèse d'Olivier Bonin a donc pour sujet *l'étude de la pertinence des indicateurs de qualité d'une base de données géographiques*.

La première année (1997-1998) a été consacrée, après une redéfinition du sujet et une étude bibliographique, à adapter la technique de l'analyse de sensibilité au domaine des applications géographiques, et à réaliser des études par simulation sur une application routière. Ces études ont donné lieu à une publication [BONIN 98]. Dans le même temps, un modèle statistique d'erreur d'attributs dans les bases de données géographiques a été conçu et paramétré. Il permet de résumer et d'agrèger les indicateurs de qualité. Les différents paramètres ont été estimés à l'aide de contrôles qualité de production sur la BD TOPO, la BD CARTO et GÉOROUTE.

Au cours de l'année 1998-1999, l'application de la technique d'analyse de sensibilité aux données géographiques a été étudiée plus avant. Une méthodologie générale a été définie, et les points d'attention que cette technique exige ont été relevés. Cette démarche et cette formalisation permettent désormais d'utiliser facilement l'analyse de sensibilité dans les applications géographiques [BONIN 99].

Dans un deuxième temps, la propagation du modèle d'erreur dans une application géographique simplifiée (en l'occurrence, calcul du temps de parcours d'un itinéraire fixé) a été étudiée. Il a ainsi été possible d'établir une relation entre la qualité des résultats et les indicateurs de qualité de la base, ce qui correspond explicitement à l'objectif visé. Cette étude a aussi permis de mettre en évidence la pertinence du modèle et de la technique d'analyse de sensibilité proposés.

Enfin, un stage sur la *simulation réaliste d'erreurs dans une base de données géographiques* a donné lieu à l'implémentation d'un outil de bruitage conforme au modèle d'erreurs établi. À cette occasion, de nouveaux développements ont été conduits sur la simulation d'erreurs corrélées [FOUQUÉ 99]. Car savoir bruiteur de façon réaliste une base de données est une des exigences de l'analyse de sensibilité, mais aussi de nombreuses autres applications (contrôle linéaire, réalisation de jeux tests, etc.).

D'autres activités de recherche sur la qualité ont été menées, de manière adjacente à l'axe principal qui vient d'être exposé.

Une thèse sur la modélisation des données surfaciques dans les BDG et leur qualification a commencé en décembre 1998. Les travaux effectués en 1999 recouvrent une étude bibliographique sur la recherche internationale en la matière. L'étude des travaux sur les données ponctuelles et linéaires a été d'abord étudié, avant leur portage pour le surfacique.

Puis l'existant spécifique aux données surfaciques a été examiné, notamment pour les données vectorielles. Il en ressort que la majorité des travaux réduisent l'objet surfacique à son simple contour, et rabattent le problème au niveau linéaire ou ponctuel. Le domaine de la reconnaissance des formes et de la vision robotique a aussi été étudié avec pour but l'identification des méthodes et algorithmes qui peuvent être applicables aux données géographiques.

Un plan de tests de modélisation et de mesure a alors été mis en place. Des tests systématiques visant à évaluer les mesures d'écart entre objets surfaciques ont permis d'étudier l'adéquation de la distance surfacique pour le contrôle qualité des données surfaciques. Cette étude vient à la suite des travaux de DEA, et a fait l'objet d'un article [BEL HADJ ALI, VAUGLIN 99], dans lequel nous proposons des cartes de qualité obtenues automatiquement à partir des mesures de la distance surfacique.

Des tests sur des mesures utilisées sur les données linéaires ont été conduits, en l'occurrence la distance de Hausdorff entre les contours. La distance de Hausdorff entre les surfaces a été implémentée, et les tests se poursuivent pour voir son comportement notamment pour les polygones "à trous" et aux agrégats de polygones. Par ailleurs, d'autres types de mesures ont été implémentés, tels les écarts entre les centres de masse des objets, l'élongation, l'excentricité, etc.

Un deuxième volet de tests a concerné les changements de représentation pour permettre la définition de nouvelles mesures d'écart. Les tests sur la modélisation des polygones par une fonction circulaire (Turning function) ont été poursuivis. Cette modélisation a été succinctement évoquée lors des travaux de DEA d'Atef Bel Hadj Ali.

Les tests se poursuivent pour leur interprétation et l'étude complète de la capacité de cette modélisation à qualifier les données surfaciques. La modélisation des données surfaciques par les moments géométriques (simples et invariants de Hu) a été lancée, ainsi que la modélisation par les moments de Legendre. La partie théorique de l'étude est en cours de finalisation. Des tests pratiques sont également effectués sur des données réelles pour voir la pertinence d'une telle modélisation.

Enfin, une modélisation développée dans le domaine de la reconnaissance de forme, basée sur l'évolution des points d'inflexion dans un lissage gaussien croissant du contour a été succinctement abordée. Bien qu'elle ait été implémentée, cette méthode n'est pas encore testée. Cependant les tests sont envisagés sur des données de l'occupation de sol. Toutes les méthodes proposées ont été implémentées soit en AML (langage propriétaire du logiciel ArcInfo) soit en C-Ansi.

Toutes ces mesures sont appliquées au jeu de données Cadastre-BDTopo représentant une zone pavillonnaire située à l'ouest de Lyon, ce qui a permis de construire une base de données "mesures" qui permet une exploitation statistique systématique pour établir des règles de décision concernant la qualité de position et la qualité de forme des données surfaciques.

L'étude des configurations des polygones en agrégats, sera à l'ordre du jour pour la poursuite des travaux, ainsi que la définition de seuils sur les valeurs des mesures, notamment dans un cadre d'appariement.

D'autre part, l'étude sur la résolution de la BDCARTO, commencée en 1998, a été poursuivie. Les coordonnées des objets de la base de données cartographiques étant inutilement trop précises, il s'agissait de proposer une solution simple pour mettre en accord la résolution des coordonnées des objets avec la résolution effective de la base de données.

La solution triviale consistant en un arrondi des coordonnées permet de réduire le volume des données et d'éviter que l'utilisateur n'accorde trop de confiance à des décimales non significatives. L'impact de ce type d'arrondi avait été étudié afin de mieux connaître la façon dont des conflits géométriques, topologiques, ou avec les spécifications peuvent apparaître à l'intérieur d'une couche ou entre couches, et en quelle quantité.

À partir des résultats obtenus sur un prototype implémenté sous ArcInfo, une classification des problèmes a été réalisée. Trois grandes catégories ont été identifiées : les problèmes topologiques auto-induits (modification de la topologie au sein d'un objet), les problèmes topologiques conflictuels (modification de la topologie d'un objet par rapport à d'autres), et les violations de spécifications.

L'outil développé détecte les situations potentiellement génératrices de problèmes, ce qui permet de les corriger manuellement. Pour toutes les autres situations, il est capable de les résoudre automatiquement. Ces travaux ont fait l'objet de deux publications en 1999 [VAUGLIN 99a] [VAUGLIN 99b]. La publication dans le magazine GIM est issue de la sollicitation directe de l'auteur par la revue, suite à la publication précédente en conférence.

Par ailleurs, cette année a vu la publication d'un livre sur la précision des données géographiques dans lequel nous avons contribué en rédigeant un chapitre [VAUGLIN 99c]. Cette publication est issue de la sollicitation directe de l'auteur par les éditeurs du livre, suite à une présentation donnée à Québec en 1998.

Le CERCOC a sollicité François Vauglin pour tenir le rôle de secrétaire du groupe de travail sur la qualité. Cette nouvelle tâche a donné lieu à une publication conjointe avec les principaux responsables de ce groupe de travail [DASSONVILLE et al 99].

La collaboration déjà ancienne avec Susanna McMaster (Macalester College, Minnesota, USA) se poursuit cette année, avec notamment la visite invitée de François Vauglin dans son laboratoire à Minneapolis-Saint-Paul. De même, la collaboration avec Francis Harvey (University of Kentucky, USA) se poursuit, notamment par un travail sur un nouveau projet.

Enfin, la collaboration engagée avec Wenzhong Shi de l'Université Polytechnique de Hong Kong a porté ses fruits : François Vauglin était membre du comité de programme du symposium sur la qualité à Hong Kong (ce qui explique notre investissement important dans ce symposium), et des échanges d'étudiants peuvent être mis en place si l'IGN et l'ENSG le souhaitent. Une visite de Wenzhong Shi au laboratoire COGIT pourrait être organisée.

Une visite du chercheur hollandais Martien Moleenar pourra avoir lieu avant la fin de l'année au laboratoire COGIT.

Fin de l'action de recherche

Dans le cadre de la redéfinition du schéma directeur de la recherche de l'IGN, il a été décidé de ne pas poursuivre cette action de recherche en l'état, mais d'exploiter ses résultats de manière transversale aux quatre nouvelles actions de recherche définies pour le laboratoire COGIT.

La règle devient donc de ne pas faire de séparation entre la recherche sur un sujet particulier et la recherche générale sur la qualité. Les études des implications de la qualité devront ainsi être systématiquement associées aux nouvelles actions de recherches du laboratoire. Car tel est finalement l'objectif de la démarche qualité : ne pas exister pour soi, mais être présente partout en support à l'action engagée.

Publications

[BEL HADJ ALI, VAUGLIN 99] Atef Bel Hadj Ali & François Vauglin : *Geometric Matching of Polygons in GISs and assessment of Geometrical Quality of Polygons*, in Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99. Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 33-43, Hong Kong Polytechnic University, juillet 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990012/S-COM, 1999.

[BONIN 98] Olivier Bonin : *Uncertainty propagation in vector geographic information systems : sensitivity analysis*, in Proceedings of 10th International Conference on Scientific and Statistical Database Management, IEEE / Computer Society, Maurizio Rafanelli and Matthias Jarke editors, pp. 254-259, Capri (I), July 1-3 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980026/S-COM, 1998.

[BONIN 99] Olivier Bonin : *Sensibilité des applications géographiques aux incertitudes : lien avec le contrôle qualité*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 70, 1999/3, pp. 71-76, IGN, Paris, 1999.

[DASSONVILLE et al 99] Laure Dasonville, François Vauglin, Antti Jakobsson & Claude Luzet : *Quality Management, Data Quality and Users, Metadata for Geographical Information*, in Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99, Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 132-143. Hong Kong Polytechnic University, juillet 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990011/S-COM, 1999.

[FOUQUÉ 99] Lucie Fouqué : *Simulation d'erreurs dans une base de données géographiques*, rapport de DESS de Mathématiques Appliquées, Statistiques et Modèles Stochastiques, Université de Rennes -1 (Institut de Mathématique de Rennes), encadré par Olivier Bonin et François Vauglin, 114 pages, IGN, Paris, laboratoire COGIT, IGN-SR 990005/S-STA, septembre 1999.

[VAUGLIN 99a] François Vauglin : *A practical study on precision and resolution in vector geographical databases*, In Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99, Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 84-94, Hong Kong Polytechnic University, juillet 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990010/S-ART, 1999.

[VAUGLIN 99b] François Vauglin : *Precision versus resolution*, to be published in GIM International, the Worldwide Magazine for Geomatics, vol 13-11, November 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990025/S-ART, 1999.

[VAUGLIN 99c] François Vauglin : *Use of Variograms to Represent Spatial Uncertainty of Geographical Linear Features, Spatial Accuracy Assessment : Land Information Uncertainty in Natural Resources*. Kim Lowel (Ed), Sleeping Bear Press/Ann Arbor Press, Chelsea Michigan, pp. 157-163, laboratoire COGIT, IGN-SR 990026/S-ART, 1999.

C.3.3 Mécanismes de mise à jour entre Bases de Données Géographiques

Thierry Badard

Contexte

À 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 l'actualisation d'une base de données multi-représentations, ou la propagation et l'intégration des évolutions 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'établir 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-représentations permettant, entre autres, d'aider à la réalisation des objectifs ci-dessus. Maîtriser les outils permettant de propager dans cette base multi-représentations, les mises à jour par analyse des changements géographiques.

Travaux réalisés

Les travaux réalisés en 1999 ont porté sur :

- la finalisation des tests liés à la mise en place d'un système de production de lots différentiels de mise à jour pour la BD CARTO. Ces tests se sont attachés à confronter les résultats obtenus par les processus mis en œuvre au laboratoire COGIT et dans les services de production de l'IGN. Les discussions et études menées parallèlement concernant le contenu et le format de ces lots différentiels se sont poursuivies et la mise en place d'un système de production permettant à court terme la mise à disposition de ces outils d'aide à l'intégration des mises à jour dans les bases de données " client " a été décidée. La possibilité de délivrer l'information de mise à jour non plus sous la forme de lots différentiels mais par lots d'évolutions à l'aide de nouvelles technologies telles que XML (*eXtensible Markup Language*), permettant l'échange de données semi-structurées sur les réseaux comme Internet a également été étudié au sein de cette action de recherche, durant cette année. Un prototype a été développé [BADARD, RICHARD 99], [BADARD et al 99]. Cela devrait, à plus long terme, permettre de fournir une solution au problème d'échange de l'information d'évolution entre systèmes d'information géographique répartis et hétérogènes,
- la réalisation d'un test de détection et d'extraction des mises à jour sur des données géographiques provenant du ministère de l'Environnement et concernant deux actualités de la BDCARTHAGE. Cette étude a donc permis de tester et prouver la robustesse et l'aspect générique de l'outil de détection de mises à jour, basé sur des méthodes d'appariement de données géographiques, développé précédemment au sein de cette action de recherche [BADARD 99a]. La livraison des résultats du test s'est faite sous forme de journaux d'évolution (proche des lots d'évolution mentionnés plus haut) directement intégrables dans le logiciel récepteur, à savoir Arcview le logiciel de système d'information géographique développé et diffusé par ESRI,
- la finalisation du test BD TOPO / TOP25 : l'étude commencée sur la propagation des mises à jour BD TOPO vers la TOP25 est sur le point d'être achevée. Les mises à jour détectées entre les deux versions BD TOPO dans la première partie de l'étude ont été pour la plupart propagées sur la TOP25 [LEMARIÉ 99]. Une étude devant montrer quelles sont les mises à jour que l'on a pu propager automatiquement et quelles sont celles qui ont nécessité une interaction, ainsi qu'une comparaison entre les coûts d'une mise à jour par propagation et d'une mise à jour " traditionnelle " d'un produit dérivé reste cependant à mener,
- la finalisation du test BD CARTO / ROUTE 500 : ce test entre des jeux de données présentant des niveaux d'abstraction plus " éloignés ", a été achevé en 1999 [BADARD 99b]. La part des mises à jour qui a pu être propagée de façon entièrement automatique a été évaluée, et un processus de reprise semi-interactif permettant

une mise à jour guidée et complète a été développée. Au final, l'ensemble du produit ROUTE 500 a pu être mis à jour de façon semi-automatique et à moindre coût par ce processus.

- la finalisation du test BD CARTO / Base " client " : ce test entre jeux de données ayant subi des modifications de la part d'un client est également sur le point d'être achevé. Les effets des mises à jour détectées entre les deux versions de la BD CARTO ont commencé à être propagées sur la BD " client ". Une étude approfondie sur le maintien de la cohérence et de l'information contenue dans la base " client " après propagation des mises à jour, reste cependant à réaliser, afin de mesurer la qualité du mécanisme de mise à jour mis au point et de finaliser cette étude,
- la fin des travaux de la thèse de T. Badard portant sur la " Propagation des mises à jour dans une base de données multi-représentations par analyse des changements géographiques ". L'année 1999 a porté sur la finalisation du croisement des typologies des liens de corrélation et des évolutions spatio-temporelles suivies par les entités géographiques modélisées, établies précédemment au cours de cette recherche, afin de déterminer l'ensemble des règles prenant en compte la nature des entités géographiques manipulées et permettant une propagation des mises à jour cohérente et sans perte d'information [BADARD, LEMARIÉ 99], [BADARD, BÉDARD 99], [BADARD, SPÉRY 99]. Il est à noter que l'établissement de cette base de règles a été fortement liée aux tests menés en parallèle dans cette action de recherche. La rédaction du mémoire de thèse devrait être initiée d'ici peu et la soutenance est prévue pour juin 2000.

Les contacts déjà établis, au sein de cette action de recherche, avec de nombreux partenaires extérieurs et notamment avec les membres du sous-axe sur le thème de la mise à jour présent de le PSIG du GdR MIS CASSINI, retenu en 1997, et ayant été déjà reconduit en 1998 pour l'année 1999 ont été entretenus.

La coopération initiée entre la France (MÉTL par l'intermédiaire du CERTU, IGN) et le Québec (MRN, Université Laval à Québec), sur l'actualisation des données à référence spatiale est, quant à elle, toujours 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.

Deux séminaires communs sur le thème de la mise à jour, un au laboratoire COGIT et un autre au Centre de Recherche en Géomatique de l'Université Laval à Québec, organisé par le Professeur Yvan Bédard, ont notamment eu lieu durant l'année 1999. La réalisation de deux publications communes pour des revues à portée internationale est en cours et devrait d'ailleurs voir le jour d'ici la fin de l'année 1999, concrétisant ainsi cette collaboration. Il est à noter que le Centre de Recherche en Géomatique (CRG) de l'Université Laval à Québec, le Ministère des Ressources Naturelles (MRN) du Québec, le GIE MEGRIN, l'Université de Keele (en particulier le Professeur Michael Worboys), la société Softeam et l'IGN ont travaillé à définir un projet sur la conception, les processus et les outils pour la maintenance des SIG. Ce travail pourra être soumis à un appel d'offre de 5ème programme-cadre.

La collaboration du laboratoire COGIT, au travers notamment de son action de recherche sur la mise à jour des bases de données géographiques, au réseau d'excellence canadien Géoïde, dirigé par l'Université Laval à Québec, est également à l'ordre du jour. Un programme d'échange d'étudiants entre cette université et le laboratoire COGIT est également en cours d'élaboration. D'autres échanges ont également été établis par le passé et ont été concrétisés, et notamment avec le laboratoire de bases de données de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), dirigé par le Professeur Stefano Spaccapietra.

Un séminaire commun IGN/EPFL a notamment été organisé à Lausanne et une réponse à appel d'offre au 5ème programme européen sur les Technologies et Sociétés de l'Information, nommée MURMUR (Multiple Résolution Multiple Représentation), a été élaborée en 1999 et acceptée par la Commission Européenne. Elle vise à fournir un ensemble de méthodes de conception et d'outils permettant la mise en œuvre de systèmes d'information géographique multi-représentations et regroupe outre le laboratoire COGIT et le laboratoire de bases de données de l'EPFL, l'Université de Lausanne (notamment le Professeur Christine Parent), l'Université Libre de Bruxelles, le CEMAGREF et l'industriel belge STAR-Informatics.

Des premiers contacts avec le Cadastre hollandais et avec l'Institut Géographique Finlandais ont été également initiés au cours de l'année 1999 et devraient se concrétiser dans un avenir proche.

Le laboratoire COGIT a également été contacté récemment pour participer éventuellement au programme ESPRC, lancée au Royaume Uni et qui vise à étudier et à résoudre les problèmes de gestion liés aux systèmes d'information géographique répartis et distribués, incluant donc les problèmes de gestion de l'évolution de la donnée géographique.

La formation d'une commission dédiée aux problèmes de mise à jour de l'information géographique est également à l'ordre du jour au sein de l'Association Cartographique Internationale (ACI). Le laboratoire COGIT a d'ailleurs assisté à la première réunion préparatoire de cette commission lors de la 19ème Conférence Cartographique Internationale organisée par cette association à Ottawa (Canada) en août dernier et a insisté sur l'importance d'un tel projet et s'est clairement exprimé en sa faveur. Ce projet devrait à n'en pas douter se concrétiser courant de l'année 2000.

Suites

Cette année marque la fin de l'action de recherche sur les mécanismes de mise à jour entre bases de données géographiques. Néanmoins, les travaux de recherche réalisés et l'expérience capitalisée au sein de cette action seront exploités au sein des quatre nouveaux axes de recherche définis au laboratoire COGIT, et plus particulièrement par l'action de recherche visant à étudier la gestion de l'information d'évolution dans les systèmes d'information géographique.

L'objectif de ce nouvel axe de recherche sera donc de traiter le problème de la gestion de l'évolution de l'information géographique de façon plus amont que ne le faisait l'action précédente, c'est-à-dire dès l'étape de conception des systèmes informatiques s'appuyant sur des données géographiques, la majorité des problèmes lors de la propagation des mises à jour étant en effet induit par ce manque de prise en compte de la gestion de l'évolution dès la phase de conception.

Elle devra donc permettre à terme la conception et la mise en œuvre de systèmes d'information géographique offrant une maintenance aisée, permettre la diffusion et l'échange de l'information d'évolution entre systèmes d'information répartis et hétérogènes et accroître l'automatisation du processus d'intégration de cette information d'évolution dans les systèmes.

Publications

[BADARD 99b] T. Badard : *Étude Route500*, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 99038/S-RAP, 1999.

[BADARD 99a] T. Badard : *On the automatic retrieval of updates in geographic databases based on geographic data matching tools*, in Proceedings of the 19th International Cartographic Conference, Ottawa'99, ICA/ACI (Eds.), Ottawa, Ontario, Canada, August 14-21, 1999, pp. 47-56, laboratoire COGIT, IGN-SR 99002/S-COM, 1999.

[BADARD, LEMARIÉ 99] T. Badard and C. Lemarié : *Propagating updates between geographic databases with different scales*, to be published as chapter of Innovations in GIS VII : GeoComputation, P. Atkinson, and D. Martin (Eds.), Taylor and Francis, London, laboratoire COGIT, IGN-SR 99034/S-COM, 1999.

[BADARD, RICHARD 99] T. Badard & D. Richard : *Livraisons des évolutions en XML - Document de travail*, rapport technique, IGN, Saint Mandé, France, 8 novembre 1999, 40 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 99031/S-RAP, 1999.

[BADARD, SPÉRY 99] T. Badard & L. Spéry : *Problèmes liés à l'échange et à l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques*, soumis à la Revue internationale de géomatique, Editions Hermès, France, 1999, 18 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 99040/S-ART, 1999.

[LEMARIÉ 99] Cécile Lemarié : *Étude TOP25*, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 99042/S-RAP, 1999.

C.3.4 Interopérabilité

Bénédicte Bucher

Contexte - objectifs

Le contexte général : l'évolution de cette problématique dans les recherches internationales

Pratiquement, l'interopérabilité renvoie aux problèmes d'interfaces entre acteurs devant travailler ensemble, ces acteurs étant des systèmes implémentés ou des individus, des communautés d'utilisateurs, etc. Rappelons que l'interopérabilité est généralement définie dans le domaine de l'information géographique comme une situation idéale où données et traitements seraient accessibles sur un réseau comme Internet, et où il serait possible de les faire travailler ensemble, c'est-à-dire d'appliquer les traitements sur les données pertinentes, et de combiner éventuellement les traitements.

La problématique de l'interopérabilité a donné lieu à deux grands courants de démarches selon la partie du problème sur laquelle les gens se sont focalisés. Il y a les recherches en méga-programmation, qui cherchent à mettre en place une architecture de modules communiquant entre eux. Et, il y a les recherches, dites en sémantique, qui cherchent à aborder le problème du point de vue des utilisateurs et à éviter la perte d'information dans les échanges.

Ces recherches ont du mal à converger : cela parce qu'elles sont dispersées entre plusieurs disciplines. Et également parce qu'elles posent, d'une part, des problèmes concrets, ce que les utilisateurs appellent " les problèmes réels des utilisateurs ", et, d'autre part, des problèmes théoriques plus abstraits, en gros, le besoin d'une théorie unifiée à un haut niveau de l'information géographique.

La communication entre ces diverses recherches est difficile, les gens ne se posent pas les mêmes questions, ne parlent pas le même langage. On peut dire que l'interopérabilité même des recherches en interopérabilité semble actuellement impossible. Il existe, de plus, des spécificités européennes au problème de l'interopérabilité, liées aux hétérogénéités des données et de leurs modalités d'utilisation : un environnement multiculturel, et l'existence de nombreuses agences cartographiques productrices de données. Ces spécificités, longtemps négligées, semblent peu à peu étudiées par les démarches internationales.

Au sein du laboratoire COGIT

L'année précédente avait permis de fixer des objectifs à cette nouvelle année. Elle a situé l'action de recherche dans le domaine de l'interopérabilité sémantique et plus particulièrement les modalités d'accès aux bases de données géographiques. François Chirié a participé à plusieurs projets européens dans le domaine de l'interopérabilité de bases de données géographiques. La thèse de Bénédicte Bucher applique les techniques d'ingénierie des connaissances en intelligence artificielle à l'accès des utilisateurs à l'information extractible de nos bases de données.

L'idée est de construire un système à base de connaissances gérant l'interface entre des utilisateurs et nos données. Ce système doit permettre à une personne, non experte en SIG et BDG, et se trouvant dans son cas particulier d'utilisation, de spécifier son besoin de données géographiques.

Activités - résultats

La formalisation d'une classe d'objets géographiques

Est-il possible de formaliser la définition d'une classe d'objets géographiques ? Il existe des travaux formalisant ces questions à l'aide d'algèbres, mais, après étude, cette voie ne semble pas prometteuse. D'autres utilisent des ontologies pour établir des correspondances entre divers modèles de données. Actuellement, il n'existe pas de formalisme définissant des classes d'objets géographiques, fidèle à la diversité des représentations mentales des phénomènes correspondant dans le monde réel.

Thèse

Un premier choix a été fait de ne pas nous appuyer sur les métadonnées existantes. Elles ont été conçues principalement pour les producteurs de données ou bien dans le cadre de transfert de données et non pas pour faciliter la compréhension que l'utilisateur doit avoir du contenu en information des bases de données géographiques. De plus, il semble que l'accès aux données doit être fédéré avec un accès aux traitements SIG et nous avons cherché à définir un système à base de connaissances pouvant, par la suite, être enrichi pour servir également d'interface avec ces traitements. Nous avons, en définitive, plutôt axé notre démarche sur le développement d'une description des besoins d'utilisateurs, qu'il nous faut mettre en correspondance avec une description du contenu des bases de données.

L'utilisateur exprime son besoin en spécifiant un objectif à atteindre, le système " connaît " plusieurs objectifs généraux correspondant à des grandes classes d'applications ou à des tâches élémentaires de manipulation de l'information géographique. La mise en correspondance s'appuie sur les méthodes de résolution de problèmes connues pour atteindre un objectif à partir de ressources données. Les données sont décrites par le rôle qu'elles jouent dans l'atteinte des divers objectifs connus par le système.

Le système a été modélisé et des contacts ont été pris avec la communauté d'ingénierie des connaissances pour critiquer cette modélisation. Une représentation orientée-objet, à l'aide du langage UML, en est en cours. Elle doit permettre ultérieurement la définition d'un prototype. Ce prototype nous permettra d'évaluer auprès d'utilisateurs l'efficacité de ce type d'accès.

Nous aimerions faire le lien entre ce travail et les connaissances acquises en généralisation au laboratoire COGIT, et en particulier, intégrer dans les ressources que nous décrivons les données issues de traitements de généralisation c'est-à-dire donner un accès, non seulement aux données des bases, mais aussi à l'information dont l'analyse spatiale nous a permis d'enrichir ces bases.

C.3.5 Nouvelles représentations

Jean-Georges Affholder

Dans notre compte rendu de l'année 1998, nous annoncions que nous nous étions éloignés d'une approche matricielle et discrète dans la modélisation du linéaire routier en vue de la généralisation, au profit d'une modélisation par arcs de cercle et de cubiques. Nous tentions de définir la notion de " séquences voisines ". Nous privilégions la notion de bibliothèques de séquences et de recherche statistique. Nos travaux de 1999 nous permettront sans doute de faire l'économie de pareilles bibliothèques et d'aboutir directement à des algorithmes efficaces, grâce à une amélioration de la modélisation. L'idée de base que nous avons suivie en 1999 consiste en fait à partir d'une double modélisation : à la polygonale initiale nous associons d'une part un objet assimilable à une courbe C_2 (courbe où la courbure varie de façon continue), d'autre part un objet assimilable à une courbe C_1 (courbe où se produisent des discontinuités dans la variation de la courbure). La modélisation par C_2 nous permet de détecter de façon triviale les deux types de conflits internes, i.e. de conflits liés à l'arc de routier pris isolément : les *empâtements* (il y aura empâtement si la courbure dépasse un certain seuil, lié à la largeur du signe conventionnel) et les *superpositions* (simple recherche combinatoire, mais plus efficace que si l'on était parti de la polygonale initiale).

Par voie de conséquence, elle résout le problème de la segmentation de l'arc en tronçons pouvant être traités isolément (et détecte ceux dont le traitement se réduit, cartographiquement, à une homothétie). Enfin, C_2 se prête mieux que la polygonale initiale au traitement des déplacements amortis (cas notamment des conflits externes). Cependant, cette modélisation se prête mal, telle quelle, au développement d'algorithmes de généralisation i.e., essentiellement, d'algorithmes de *suppression*, de *fusion*, d'*exagération* (homothétie locale) ou de *caricature* (affinité) de virages.

C'est ici qu'intervient la modélisation par C_1 : la polygonale est approximée par des segments de droite, des arcs de cercles et des courbes de raccordement. Ces courbes de raccordement ne sont plus des cubiques, mais des CL2 (courbes où la courbure est proportionnelle à la racine carrée de l'abscisse curviligne).

Cette dernière modélisation (assimilable à un cas particulier de modélisation par l'équation intrinsèque) permet non seulement une bonne compression de l'information, mais surtout, le développement des algorithmes que nous venons de mentionner : des résultats prometteurs ont déjà été obtenus.

L'an 2000 devrait nous permettre de dire si la voie suivie en 1999 suffit pour obtenir passer à la phase opérationnelle, ou s'il y aura lieu de réactiver la notion de bibliothèque de formes (dans ce dernier cas, il ne s'agirait pas de revenir à la situation antérieure, mais de partir au contraire des acquis de cette année)

Publication

[AFFHOLDER 99] Jean-Georges Affholder : *Modélisation du linéaire routier et algorithmes de généralisation : état de l'art*, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 990044/S-RAP, 1999.

C.3.6 Généralisation contextuelle

Annabelle Boffet, Jean-François Hangouët et Anne Ruas

Contexte - objectif

Un système de généralisation totalement automatique est certainement utopique. Les motivations de nos recherches, dans une perspective de production à l'IGN, sont celles de l'aide à la conception cartographique et plus généralement de l'aide à la dérivation de données géographiques à un niveau plus synthétique : des palettes d'outils automatiques qui sachent reconnaître et traiter des objets particuliers (généralisation indépendante), reconnaître des groupes géographiques et proposer des transformations (généralisation contextuelle) et qui puissent aussi soulager l'opérateur cartographe du choix entre divers outils applicables à tout moment du processus de généralisation (stratégie).

Notons que la généralisation est fondamentalement contextuelle : les composants de la carte sont toujours redessinés et utilisés en fonction de leur participation explicite ou implicite au paysage géographique de la zone considérée.

Après quelques travaux sur la généralisation indépendante (notamment des objets linéaires, avec les thèses de Corinne Plazanet en 1996 et de Emmanuel Fritsch en 1997, mais aussi des bâtiments avec le mémoire de DEA de Sylvain Damour en 1994, les travaux de généralisation au laboratoire COGIT ont porté principalement sur la généralisation contextuelle.

Rappelons les recherches sur :

- la généralisation de l'orographie (thèse de Pascale Monier en 1997),
- la généralisation des réseaux routiers,
- l'élaboration des règles de généralisation pour employer des algorithmes adaptés aux situations
- les *analyses, regroupements et traitements* d'objets séparés dans la base mais qui participent sur le terrain à un même phénomène géographique pertinent pour la carte à produire et
- les *stratégies* d'orchestration des outils et connaissances pour le bon déroulement d'une généralisation.

Activités - résultats

En 1998, il y eut notamment les activités d'Anne Ruas sur les stratégies d'orchestration, l'achèvement des thèses de Nicolas Regnauld et de Jean-François Hangouët sur des principes et méthodes de généralisation du bâti en zone urbaine et le tout début de la thèse d'Annabelle Boffet sur l'analyse du tissu urbain.

En 1999, les activités ont continué, moins sur l'élaboration d'algorithmes élémentaires de transformation contextuelle que sur les problèmes d'analyse préalable, sur l'enjeu de cette analyse, sur les outils de mesure utilisables, sur l'évaluation des situations données, sur l'évaluation des situations créées par les algorithmes de transformation, sur l'enchaînement des algorithmes, sur l'information consultable par ces algorithmes pour fonctionner au mieux

Quatre points principaux sont détaillés ci-après :

- analyse des structures urbaines pour mieux les conserver lors de la généralisation,
- continuation de la réécriture d'algorithmes d'analyse spatiale à partir des diagrammes de Voronoï, vus comme structure unificatrice de nombreux problèmes élémentaires,
- tentative de distinction des déclinaisons constitutive et exploratoire de l'expression " analyse spatiale " pour aider à l'interprétariat entre discours des généralisateurs et discours des géographes,

- mise au point d'un modèle de choix automatique d'opérations de généralisation en fonction de différents niveaux d'analyse, de contraintes et d'autonomie (achèvement de la thèse d'Anne Ruas).

Analyse des structures urbaines

Suite aux travaux de thèse de Nicolas Regnaud (mai 1998), Jean-François Hangouët (novembre 1998) et Anne Ruas (avril 1999) sur la généralisation du bâti, une thèse a débuté en octobre 1998 sur la description de la ville.

Cette recherche repose essentiellement sur le principe d'échelle d'analyse "*micro, méso, macro*" développé par Anne Ruas (cf. Modèle de choix automatique d'opération de généralisation).

La ville est un objet méso lui-même composé d'objets méso : les îlots urbains, composés d'objets micro : les bâtiments et les rues. Dans les bases de données actuelles, la description de l'espace n'est disponible qu'au niveau micro. Ce niveau micro s'avère insuffisant pour généraliser correctement un espace aussi dense et complexe que la ville. L'objectif est donc de mieux qualifier les tissus urbains ; de façon plus générique, il s'agit de développer des méthodes de description (à différents niveaux) d'espaces complexes. Cette meilleure description des espaces permet, d'une part, de mieux les conserver pendant le processus de généralisation, d'autre part, de répondre à d'autres applications en SIG (requêtes urbaines).

Durant l'année 1999, des outils et méthodes de *structuration de la ville* ont été développés :

- après une phase de bibliographie, de premières propositions théoriques ont été formulées dans un article intitulé "*A Framework for Automated Spatial Analysis Based on Spatialization Principle*", présenté au *atelier Progress and Development in Automated Map Generalization*, à Ottawa, en août. Cette proposition repose sur la notion de principes de spatialisation définis par les géographes Pinchemel comme "*les principes de peuplement, d'appropriation du sol, de gestion, d'exploitation, d'établissement de réseaux, produits par une société sur un espace destiné à son usage*". Ces principes de spatialisation sont à l'origine de répartitions caractéristiques des tailles, proximités, densités et angles entre objets micro de la ville. Concernant l'analyse des angles entre objets et de la régularité de ces angles, les principes d'alignement, de parallélisme, d'orthogonalité et de fermeture sont les plus visuellement évidents dans la ville. La notion de régularité visuelle trouve ses fondements dans la théorie du Gestalt (voir thèse de Nicolas Regnaud en 1998 pour l'application de cette théorie à la généralisation du bâti urbain),
- un stage de six mois effectué par Caroline Coquerel a permis d'implémenter une classification automatique de l'urbain sur le logiciel Lamps2 de Laser-Scan. Des résultats très satisfaisants ont été obtenus sur deux villes de 2 000 et 6 000 habitants. Cette classification permet de distinguer les îlots urbains de type majoritairement industriel, sportif ou d'habitat. Elle identifie les îlots hétérogènes et analyse les densités.

L'identification du centre ville à partir de la classification est en cours, elle permet de compléter la structuration et qualification de la ville en quartiers homogènes. *Une analyse contextuelle des quartiers* en fonction de modèles urbains doit suivre, elle permet de décrire l'organisation spatiale des îlots définis dans la classification (recherche de gradients de densité centre - périphérie, de secteurs d'activité, d'axes de développement de la ville).

L'implémentation de la reconnaissance de formes types (régularité de rapport angulaire : alignement, parallélisme, orthogonalité) issues des principes de spatialisation constitue une des futures tâches à accomplir.

Réécriture d'algorithmes d'analyse spatiale en Voronoï

Lire les données disponibles est nécessaire pour pouvoir les interpréter dans le sens désiré par les spécifications de la généralisation à réaliser... Une structure utile à diverses opérations de lecture automatique est le diagramme de Voronoï, appliqué non à des points mais aux segments et à leurs extrémités qui constituent toute la géométrie des données géographiques numériques. Ce diagramme associe à chaque segment ou extrémité la zone des points du plan qui lui sont plus proches.

Un chapitre de la thèse de J.-F. Hangouët en 1998 détaillait des opérations d'analyse spatiale, élémentaires mais récurrentes et laborieuses, que simplifiait l'emploi de Voronoï : enveloppe convexe, arbre recouvrant minimal, dilatation, érosion, ouverture, fermeture, squelette, fonction distance d'une ligne polygonale à une autre, distance de Hausdorff entre objets linéaires, distance de Hausdorff entre objets surfaciques, calculs de densité, de fortes proximités En 1999, cet inventaire des possibilités du diagramme Voronoï sur segments comme structure unificatrice de calculs a été présenté à un séminaire mêlant cartographie et géométrie algorithmique.

Il a aussi été poursuivi. Par exemple, la représentation géométrique et non plus seulement figurative du filé des eaux a aidé à la lecture des fleuves et des côtes pendant près de deux cents ans (cf. quelques premiers exemples sur la "Carte Géométrique du Comté de Nice" en 1762, et quelques derniers exemples sur les publications de 1944 de l'édition au 20 000^e trichrome de la Nouvelle Carte de France) et elle peut être considérée comme une symbolisation contextuelle des limites des composants géographiques.

Disposant d'un diagramme de Voronoï, ces isorythmes d'éloignement se dessinent simplement : dans chaque cellule, des arcs de cercle (si le site originel est un point) ou des segments (si le site originel est un segment) (figure C.3.6.1, page suivante).

Le calcul de la dimension de Bouligand-Minkowski d'une ligne polygonale (utile comme mesure de fractalité d'une ligne, caractère qu'on peut vouloir conserver au cours d'une généralisation), apparemment un autre problème (mesure impliquant le rapport $\log S(\varepsilon) / \log \varepsilon$, où $S(\varepsilon)$ est la surface de la saucisse de rayon ε autour de la ligne) est en fait équivalent : il faut calculer les limites des couches successives tout autour de la ligne pour calculer leurs surfaces.

À propos de dimension fractale d'une ligne : a commencé l'étude d'une mesure plus immédiate encore, impliquant le rapport $\log N(\varepsilon) / \log \varepsilon$, où $N(\varepsilon)$ est le nombre d'arêtes de Voronoï qui portent une distance minimale à la trace de l'objet inférieure à ε .

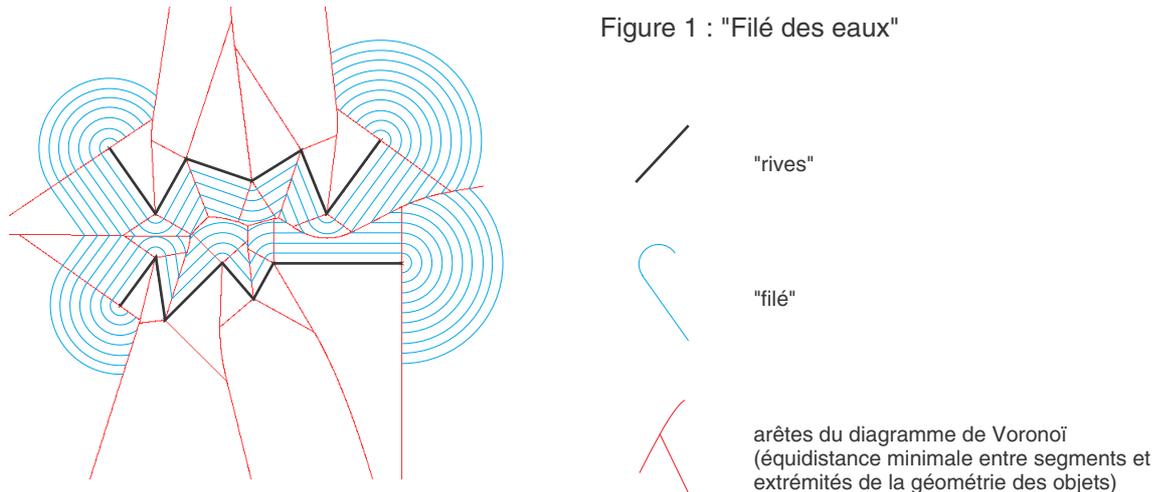


figure C.3.6.1 : filé des eaux

Le calcul d'un diagramme de Voronoï sur des segments est lui-même un problème complexe et le programme utilisé ne fonctionne pas systématiquement. Cela étant, la seule compréhension des propriétés de ces diagrammes permet de programmer des approximations mesurées de calculs difficiles.

Ce fut le cas d'un nouvel algorithme de calcul en mode vecteur de la distance de Hausdorff entre deux lignes polygonales. La distance de Hausdorff entre deux objets A et B est la plus grande des composantes $D(A > B)$ et $D(B > A)$ où $D(X > Y)$ est la plus grande des plus petites distances des points x de X à Y.

Cette distance est intéressante en généralisation (entre autres) car, fournissant quelque chose comme " le plus grand écart ", elle permet de mesurer notamment l'éloignement d'un groupe d'objets généralisés à leur trace initiale, et de contrôler la précision de position de la généralisation.

Sur des lignes polygonales, $D(X > Y)$ est réalisée soit au niveau des sommets de X, soit au niveau des intersections de X avec le diagramme de Voronoï de Y. En rajoutant suffisamment de points sur X, on approche les intersections théoriques avec le Voronoï de Y.

De plus, en observant les projections de ces nouveaux points de X sur Y, on peut juger de leur appartenance à une même cellule du Voronoï théorique de Y, et donc ensuite chercher les ruptures de projection : jusqu'ici on se projetait sur tel segment, désormais sur tel autre. Leur médiatrice commune est, ou approche, le diagramme de Voronoï de Y localement pertinent (figure C.3.6.2).

Alors, la plus grande distance à Y des intersections avec X de telles médiatrices est, ou majeure, la composante $D(X > Y)$ de la distance de Hausdorff entre X et Y.

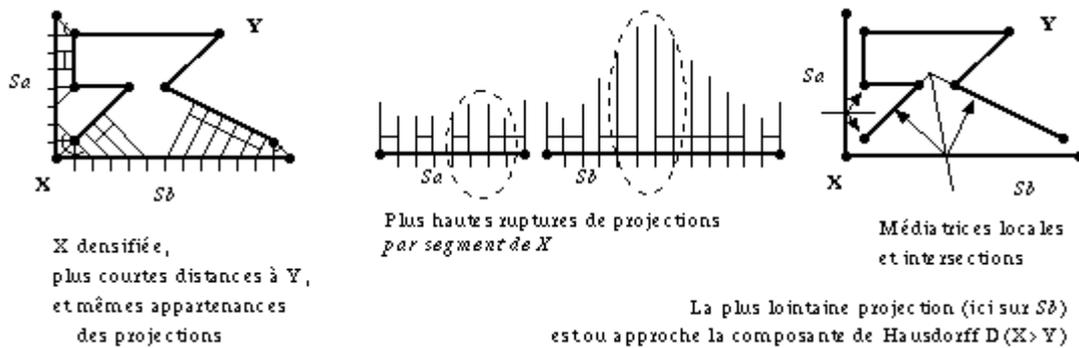


figure C.3.6.2 : densification de la polygonale L1, et étapes du calcul de la composante de Hausdorff $D(L1>L2)$

Les deux sens de l'expression "analyse spatiale" dans notre domaine

Dans un souci d'une ouverture et aux besoins et aux méthodes de la géographie, une distinction d'ordre épistémologique des diverses activités de l'"analyse spatiale automatique" a été tentée et présentée au colloque de géographie Théo Quant.

On reconnaît deux catégories essentielles : d'une part, les activités d'analyse spatiale qui ont trait à la reconstruction des liaisons cartographiques entre les données numériques ("analyse spatiale constitutive", nécessaire à la généralisation et, plus globalement, pratique idéale des cartographes), d'autre part, celles qui sont liées à la recherche d'une explication imprévue à leur disposition ("analyse spatiale exploratoire", pratique idéale des géographes). Les outils algorithmiques sont parfois les mêmes, mais leur déclenchement et l'interprétation de leurs résultats diffèrent.

L'analyse exploratoire a pour archétype la chorématique de R. Brunet (suite d'esquisses d'un phénomène jusqu'à trouver une représentation satisfaisante). Son principe est celui de l'interprétation (données vues à travers l'idée de structurations pré-conçues). Dans l'analyse exploratoire, on réfléchit sur les données, on teste ce qui peut apporter une explication au phénomène tel qu'il se présente.

Les données sont questionnées pour les sens qu'on peut attendre d'elles, jusqu'à ce que l'organisation trouvée s'accorde à la structuration envisagée - s'accorde harmonieusement, il n'y a pas d'autres critères. Programmer l'analyse exploratoire, c'est dans une certaine manière augmenter l'outillage au service de cette analyse, et l'augmenter sans fin.

La généralisation est l'archétype de l'analyse constitutive, analyse éminemment préalable qui consiste à s'emparer des données On les accepte telles qu'elles sont, on les voit pour ce qu'elles représentent du paysage. On sait les phénomènes qu'elles représentent, immédiatement (il faut, certes apprendre à lire des cartes, mais l'habitude ensuite et même l'intuition dispense du labeur).

On en rend compte en les interprétant le moins possible, en les *imitant* (le terme n'a pas naturellement la connotation négative banalisée par Platon) *au mieux* - ce mieux se jugeant à la fidélité aux phénomènes donnés, engagement d'ordre éthique.

La programmation de l'analyse constitutive est sa transcription par ordinateur, ontologiquement achevable (quand l'ordinateur saura s'emparer du paysage, les recherches pourront se porter sur l'infini des interprétations de l'analyse exploratoire), le tableau C.3.6.1.

tableau C.3.6.1

Caractéristiques comparées de l'analyse spatiale exploratoire et de l'analyse spatiale constitutive.

	Analyse exploratoire	Analyse constitutive
archétype	chorématique	généralisation
principe	interprétation	imitation
données	questionnées	acceptées
appréhension	réfléchie	réflexe
explicabilité	testée	connue
programmation	augmentation	répétition
sanction	esthétique	éthique

Modèle de choix automatique d'opérations de généralisation

Les recherches en stratégie de généralisation reposent sur un ensemble de concepts décrits dans la thèse d'Anne Ruas. Ne sont abordés ici que les principes fondamentaux, illustrés dans les figures 3 et 4.

L'automatisation du processus de généralisation impose que le système puisse reconnaître les entités qui nécessitent une généralisation. La nécessité de généralisation dépend d'informations de contrôle qui sont introduites au début du processus, telles que le thème de la carte, l'échelle finale (dans le cas d'une carte), les quantités de réduction requises etc,...

Ces informations doivent être traduites sur les données géographiques qui décrivent leurs insatisfactions. La traduction des spécifications de généralisation requiert une identification des caractères qui porteront des contraintes à respecter.

Ces caractères (forme, taille, position, densité, alignement, quantité d'information etc.) existent à différents niveaux d'analyse que nous appelons :

- micro : lorsqu'ils sont portés sur un objet initial ou une partie d'objet (par exemple, une maison),
- méso : lorsqu'ils reposent sur un groupe d'objets (par exemple, un quartier),
- macro : lorsqu'ils reposent sur une population d'objets (par exemple toutes les routes).

En phase de recherche, nous identifions les caractères importants pour un processus de généralisation, les méthodes et mesures nécessaires pour décrire ces caractères et les façons de contraindre ces caractères en fonction des spécifications de chaque généralisation. La figure C.3.6.3 résume le processus d'identification des caractères et des contraintes portées par ces caractères.

La démarche proposée repose sur l'autonomie décisionnelle des entités géographiques. L'espace géographique est ainsi constitué d'un ensemble d'objets, appelés situations, définies à différents niveaux d'analyse. Ces situations sont capables de s'auto-analyser en consultant les violations de contraintes portées par leurs caractères. Chaque caractère contraint est une entité qui dispose de méthodes pour analyser l'écart entre son état courant et son état idéal.

Les contraintes étant de natures hétérogènes, les situations consultent leur degré d'insatisfaction ainsi que leur priorité relative afin de décider de la meilleure contrainte à résoudre à un instant donné ainsi que de la meilleure opération de généralisation à réaliser. Les contraintes instanciées fournissent à leur situation des propositions ordonnées de traitements afin de faciliter les choix algorithmiques.

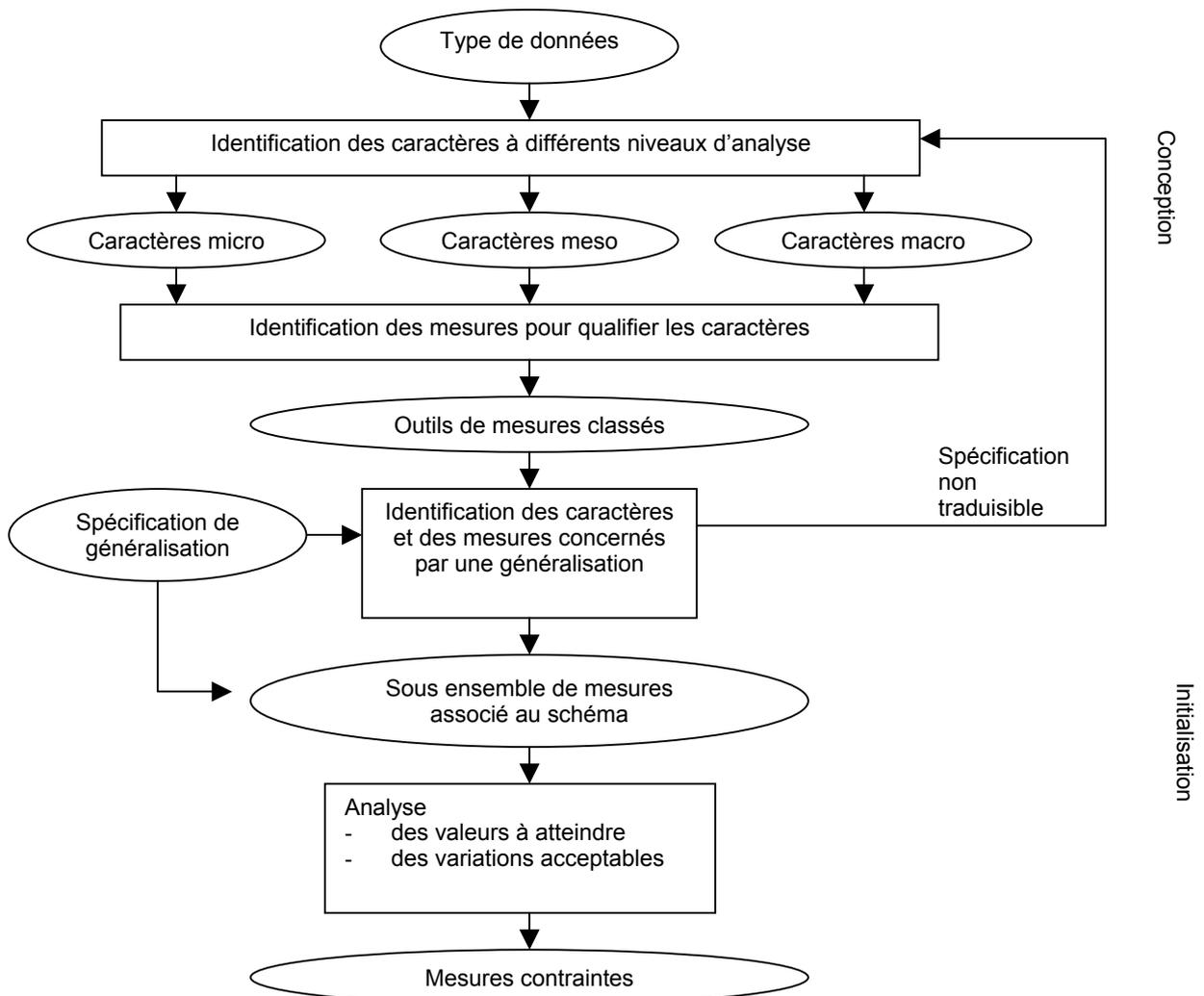


figure C.3.6.3 : identification des caractères et des contraintes à différents niveaux d'analyse [RUAS 99]

La généralisation d'une situation géographique est une démarche progressive, les contraintes étant progressivement respectées par l'usage contrôlé d'algorithmes de généralisation. Selon la nature des situations, des contraintes non respectées et des connaissances procédurales, la stratégie de généralisation peut être stochastique ou déterministe. Chaque opération réalisée est contrôlée par la situation en évaluant l'amélioration ou la détérioration de l'état de ses contraintes. La figure C.3.6.4 résume ce processus.

Ce processus de généralisation repose sur un enrichissement considérable de la description de l'espace géographique notamment par l'identification des phénomènes géographiques du niveau méso. La modélisation des données a été expérimentée sur Stratège dans le cadre de la généralisation de données urbaines et est en cours d'implémentation sur la plate-forme LAMPS2 dans le cadre du projet AGENT.

La dynamique du système a fait également l'objet de nombreux développements sur Stratège (notamment les relations entre contraintes et situations). Les mécanismes décisionnels entre niveaux micro et méso, ainsi que l'apprentissage dynamique, nécessitent davantage de recherches.

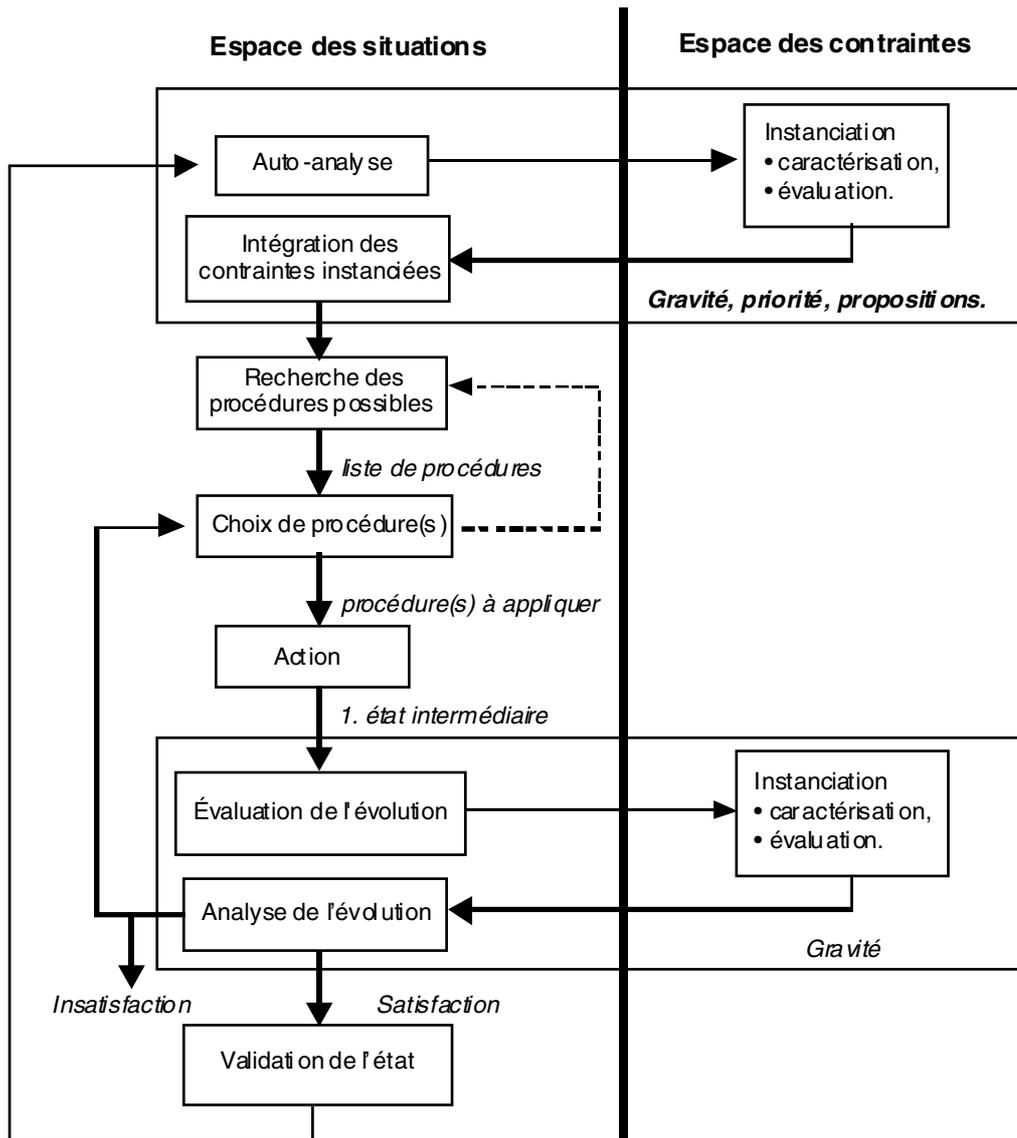


figure C.3.6.4 : prise en compte des contraintes pour le choix des procédures de généralisation [RUAS 99]

Clôture de l'action recherche

Récapitulatif des résultats

Bien entendu, cette action recherche n'a pas produit un système de généralisation générique qui prenne en entrée d'un côté des données géographiques numériques, de l'autre les spécifications de la généralisation à réaliser, et réalise alors automatiquement cette généralisation.

De tels systèmes génériques, pour des cartographies de grande qualité, restent sans doute utopiques ; pour des cartographies temporaires, appartiennent à l'avenir - à l'avenir très lointain devait-on préciser au début de cette action recherche, mais les avancées sont considérables, et, sans que l'on puisse chiffrer les efforts, autorisent cependant plus d'optimisme.

Quoi qu'il en soit, l'objectif pour la production est d'une certaine manière atteint puisque la plupart des algorithmes développés dans l'action de recherche ont été, notamment *via* le projet AGENT, intégrés dans le SIG LAMPS2 dont s'équiperont au cours de l'an 2000 certaines lignes de production de l'IGN.

Les apports de l'action recherche à l'automatisation de la généralisation contextuelle - apports réalisés tant dans l'ordinateur que dans les littératures scientifiques nationales et internationales et dans les contacts nationaux et internationaux - sont de quatre ordres :

- les résultats " géométriques " : l'adaptation d'outils mathématiques (méthodes de classification, triangulations de Delaunay, diagrammes de Voronoï, Arbre recouvrant minimal) aux analyses cartométrique et cartologique des données numériques. Il faut aussi mentionner, en retour, l'amélioration de la compréhension, voire le développement, de ces outils mathématiques eux-mêmes,
- les résultats " analytiques " : des formulations sur l'importance, la difficulté et la subtilité de l'analyse automatique des données nécessaire à leur généralisation ou utilisation intuitive - analyse qui doit tout autant reconstruire objectivement un fond cartographique à partir des données séparées, que reconstruire explicitement les centres d'intérêts plus ou moins particuliers de l'utilisateur de la carte. L'ouverture encore timide à la Géographie a permis le renforcement, par comparaison et enrichissement, de la compréhension de l'enjeu de l'analyse. Anne Ruas dans sa thèse en vient d'ailleurs à préconiser pour les systèmes de généralisation tels qu'elle les propose, la dénomination, non plus de SIG, mais de SAG, pour *Systèmes d'Analyse Géographique*,
- les résultats " visuels " : les algorithmes et les processus développés sur la plate-forme Stratège et ceux portés ou développés sur la plate-forme LAMPS2 notamment pour le projet AGENT. Ce sont divers opérateurs élémentaires de généralisation contextuelle (sélection, déplacement, agrégation, typification, symbolisation...) mais aussi des programmes et des méthodes pour leur application effective à des cas de cartes (évaluation de leur applicabilité après observation des données, évaluation des répercussions sur le paysage cartographique et gestion de leur enchaînement vers une généralisation compatible avec les spécifications). Le tout a été appliqué au traitement des zones urbaines, prises pour leur valeur exemplaire : en effet, tant au niveau de la *programmation* qu'à celui de la *description* de ces outils conçus à propos des données cartographiques urbaines, s'est exercé l'effort constant de distinguer d'une part la spécificité urbaine des données, d'autre part leur généralité de données cartographiques,
- les résultats " épistémologiques " : les justifications théoriques et les prises de recul sur le travail effectué. Il s'agit des formulations des principes d'appréhension des données numériques par le chercheur en automatisation de la généralisation (approches par la Gestalt, par la phénoménologie, par les principes de spatialisation). Il s'agit aussi de la formulation explicite des concepts fondamentaux du processus de généralisation (les objets " méso ", les comportements autonomes soumis à contraintes - concepts d'Anne Ruas devenus d'ailleurs les moteurs du projet AGENT et, plus généralement, des paradigmes largement acceptés par la communauté des généralisateurs).

Nouveaux départs

La généralisation constituant l'essence de la cartographie (la cartographie, au sens le plus large, n'inclut par ailleurs que les techniques d'acquisition des données), les enseignements et les méthodes de cette action de recherche ne s'arrêtent pas avec elle : ils seront mis à profit de manière naturelle, et développés, dans les nouveaux axes de recherche.

On peut mentionner notamment :

- les techniques d'analyses cartométrique et cartologique utiles à l'organisation des données numériques dont ont besoin les futures recherches sur l'accès aux données dérivées, l'unification des bases de données, la gestion des évolutions dans les BDG, les applications des SIG aux études de risques, et bien sûr l'action transversale sur l'analyse spatiale, à partir de 2000,
- les algorithmes d'analyse et de transformation d'un jeu de données vers les spécifications indiquées pour l'accès aux données dérivées, dont l'enjeu est " la carte à la demande " - qui se nourrit aussi des résultats de l'action de recherche sur l'interopérabilité (Cf. C.3.4), sur l'analyse automatique non plus des données, mais des spécifications et plus largement des besoins des utilisateurs,
- l'intégration (encore balbutiante) dans l'appréhension des problèmes cartographiques, des problématiques des géographes pour l'accès aux données dérivées, dans le cadre des applications des SIG aux études de risques et dans un cadre plus large d'une base de données unifiée,
- l'expertise sur les transformations responsables du polymorphisme des données géographiques numériques à différentes échelles concernant dont l'enjeu est l'unification de bases de données existantes,

- les précautions épistémologiques utiles à la programmation rigoureuse de la lecture automatique des données géographiques nécessaires -semble-t-il- pour les applications des SIG aux études de risques, où le discours sur les catastrophes doit être impartial.

Publications

[BOFFET 99] A. Boffet : *Framework for Automated Spatial Analysis Based on Spatialization Principles*, Progress and Developments in Automated Map Generalization, ICA'99 Workshop, August 12-14, laboratoire COGIT, IGN-SR 990045/S-COM, 1999.

[COQUEREL 99] C. Coquerel : *Classifications de zones urbaines, Développement d'outils de classifications à partir de la BD Topo de l'IGN, sous le SIG. orienté-objet LAMPS2*, mémoire de fin d'études pour l'obtention du DAA : Traitement de l'Information Spatiale, École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, laboratoire COGIT, IGN-SR 990006/S-STA, septembre 1999.

[HANGOUËT 99a] J.-F. Hangouët : *Analyse spatiale et phénomènes géographiques*, Quatrièmes rencontres de Théo Quant, Besançon (F), février 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990014/S-COM, 1999.

[HANGOUËT, LAMY 99] J.-F. Hangouët & S. Lamy : *Automated Cartographic Generalization : Approach and methods*, Proceedings of 19th ACI/ICA Conference, Ottawa'99, Canada, Aug. 1999, pp.1063-1072, laboratoire COGIT, IGN-SR 990028/S-COM, 1999.

[HANGOUËT 99b] J.-F. Hangouët : *La géographie dans l'automatisation de la généralisation cartographique*, in Bulletin du Comité Français de Cartographie, n° 161, septembre 1999, pp. 63-68, laboratoire COGIT, IGN-SR 990027/S-ART, 1999.

[HANGOUËT 99c] J.-F. Hangouët : *Automated spatial analysis and the naturalness of Voronoi diagrams*, Dagstuhl Seminar : Computational Cartography, septembre 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990022/S-COM, 1999.

[HANGOUËT 99d] J.-F. Hangouët : *Généralisation cartographique automatique : approche et méthodes*, Bulletin du Comité Français de Cartographie, n° 162, décembre 1999, pp. 61-70, laboratoire COGIT, IGN-SR 990046/S-ART, 1999.

[RUAS 99a] A. Ruas : *Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie*, thèse de doctorat, université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 990009/S-THE, 1999.

[RUAS 99b] A. Ruas : *Modèle de généralisation de données urbaines à base de contraintes et d'autonomie*, in Revue Européenne de Géographie, <http://www.cybergeopresse.fr>, laboratoire COGIT, IGN-SR 990047/S-ART, 1999.

[RUAS 99c] A. Ruas : *The Role of the Meso Level for Urban Generalisation*, Progress and Developments in Automated Map Generalization, ICA'99 Workshop, August 12-14, 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990048S-COM, 1999.

C.3.7 Généralisation des réseaux

Emmanuel Fritsch et Xavier Barillot

Contexte - objectif

Cette action de recherche porte sur la généralisation des réseaux, et plus particulièrement du réseau routier. Le thème routier a été privilégié ses dernières années dans les recherches du laboratoire COGIT, et ce pour plusieurs raisons : d'une part, le thème routier occupe un volume important des données saisies dans les bases de données et des objets représentés sur une carte.

D'autre part, les tracés routiers obéissent à un ensemble varié de contraintes, offrant ainsi en réduction un condensé des difficultés de la généralisation. Après des recherches importantes portant sur la généralisation indépendante, c'est-à-dire la généralisation d'objets pris considérés en dehors de leur contexte, le laboratoire COGIT a fait porter ses efforts sur la prise en compte du contexte.

Parallèlement à une prise en compte globale du contexte, à laquelle s'attachait l'action de recherche "Généralisation contextuelle", il semblait important de se focaliser sur un type particulier de relations entre objets, induites par la notion sémantique de réseau.

La notion de contexte doit être étudié sous plusieurs aspects : en premier lieu, l'étude de la sémantique de la relation contextuelle (ce que le lecteur de la carte retire de la perception d'une relation entre objets), ensuite la formalisation mathématique de cette relation, et enfin, le traitement algorithmique qu'on associe à cette relation pour en obtenir une généralisation cartographique. Ces trois points doivent être traités de conserve, et l'on ne saurait obtenir de résultats satisfaisants si l'on en négligeait un.

Activités - résultats

En 1999, l'action de recherche "Généralisation des réseaux" a renforcé son implication dans le projet AGENT.

L'étude sur les mesures pour les réseaux a porté autant sur les mesures relatives au réseau que sur les mesures indépendantes. En effet, si la généralisation indépendante commence à être bien maîtrisée, son intégration dans un processus contextuel réclame une évaluation fine des résultats obtenu dans le processus indépendant. Cette évaluation passe ainsi par des mesures.

D'autre part, la spécificité des réseaux est prise en compte au niveau sémantique, par une analyse et une formalisation de leur utilisation en tant que moyen de communication ou de circulation de flux. Cette dimension particulière des réseaux est prise en compte, d'une part, dans l'adaptation pour la plate-forme AGENT de l'algorithme de sélection de Jean-Louis Reynes, basé sur le plus court chemin, d'autre part, sur une amélioration des algorithmes de sélection fondés par un algorithme adaptatif de la diffusion.

On peut donc distinguer dans cette action de recherche les points suivants :

- étude des mesures,
- adaptation de l'algorithme de sélection de J.-L. Reynes pour la plate-forme AGENT,
- amélioration des algorithmes de sélection par un modèle adaptatif de diffusion.

Étude des mesures

À la fois dans le cadre du projet AGENT et dans le cadre d'une recherche à moyen terme, quelques mesures ont été analysées et/ou écrites et testées dont des mesures de description de virages (hauteur/base, orientation, hauteur,...) et des mesures de découpage en virage, de caractérisation de ces virages et de regroupement en tronçons homogènes selon des critères à définir.

Cette deuxième série de mesures s'appuie, entre autres, sur une modélisation de la polygline initiale (suite de points) en paraboles et cubiques, mise au point en 1998 et améliorée en 1999.

En marge de ce travail, beaucoup de temps a été consacré à une réflexion sur les mesures dans le processus de généralisation et à la rédaction d'un rapport avec une partie théorique synthétisant cette réflexion et une partie plus pratique décrivant les mesures contextuelles (sur plusieurs objets ou sur un objet en tenant compte du contexte) jugés nécessaires dans le processus de généralisation. Ce rapport a été réalisé à la demande du projet AGENT.

Adaptation de l'algorithme de sélection de J.-L. Reynes pour la plate-forme AGENT

Dans le cadre de l'enrichissement de la plate forme Agent en algorithmes diversifiés, il a été décidé d'implémenter l'algorithme de sélection développé par J.-L. Reynes en 1997. Cette opération nécessitait quelques modifications de l'algorithme afin de permettre la mise en place d'une commande unifiée, avec un nombre limité de paramètres. Les routines topologiques comportant encore des erreurs, l'algorithme n'a pas encore pu être testé et les opérations de mise au point nécessiteront encore quelques journées de travail sur l'année 2000.

Modèle de réseau par diffusion

L'algorithme de hiérarchisation de réseau par modèle de circulation le long des axes a été développé. Après l'année 1998 qui avait vu la critique du travail de B. Morisset en tant qu'application performante de la technique multi-agents, et le développement d'une technique dans laquelle les flux soient réellement interdépendants ; L'année 1999 a été utilisée à la mise sur pied d'un modèle de rétro contrôle prenant en compte le travail de généralisation en cours.

La plupart des méthodes de sélection repose sur une hiérarchisation préalable des arcs au vu des critères de sélection retenus. Cette hiérarchisation est symbolisée par une fonction de coût d'élimination de chaque arc. Ensuite, une simple coupure enlève les arcs les plus bas dans la hiérarchie, et conserve les plus importants. Cette coupure se fait soit, sur un seuil prédéfini au sein de la hiérarchie, soit, par un taux d'élimination défini comme paramètre de l'algorithme.

L'inconvénient de ce type de méthode est que deux arcs de même importance, proches et parallèles, remplissent dans l'espace géographique une fonction de desserte équivalente. Ils auront donc au vu des critères une importance voisine, et donc une fonction de coût équivalente : par la méthode précédemment décrite, ils seront donc soit éliminés ou conservés, mais toujours ensemble.

Or, pour maintenir la fonction de réseau, innervant l'espace géographique, il est important de forcer un choix entre l'un ou l'autre des deux arcs. Ainsi là où on souhaite conservé un seul arc, soit l'un soit l'autre, les méthodes de sélection par coupure d'une fonction de coût ont tendance soit à conserver les deux arcs, soit à n'en conserver aucun.

Une autre possibilité serait une élimination décrementale, éliminant à chaque itération un seul arc (le minimum de la fonction de coût) et recalculant la fonction de coût après chaque élimination. Le problème de cette approche est que l'on perd la référence à la signification originale des données, l'ensemble des arcs en cours de traitement devenant, pour l'itération en cours, la référence de la généralisation.

D'autre part, on rencontrerait un problème courant en généralisation qui est celui de la reprise d'une action qui se révèle peu conforme aux résultats attendus : il faut pouvoir éliminer des arcs, mais il faut aussi pouvoir en rajouter s'il se révèle que certains ont été retirés abusivement.

On se heurte alors à la perspective de situations cycliques insolubles. Plutôt que de considérer une coupure nette (élimination en dessous d'un seuil, sélection au-dessus) le processus que nous développons repose sur un seuil progressif : tout au long du processus, l'appartenance de chaque arc au graphe final est représentée non par un booléen (oui/non) mais par un coefficient d'appartenance continu entre 0 et 1.

Les arcs les plus intéressants selon la fonction de coûts voient leur coefficient d'appartenance augmenter, et les moins intéressants voient leur fonction de coûts diminuer. À l'itération suivante, le coefficient d'appartenance est réinjecté dans le calcul de la fonction de coût, en particulier dans le modèle de desserte du modèle.

Cette opération introduit dans le processus une rétroaction positive, qui force les coefficients d'appartenance vers les valeurs 0 ou 1. Mais par ailleurs, si le coefficient d'appartenance d'un arc a subi une variation dans un sens contraire à la tendance des contraintes actuellement actives, ces dernières peuvent contrer la rétroaction positive.

Le dispositif provoque donc une séparation progressive des appartenances, définissant ainsi deux ensembles d'arcs correspondant à la sélection et à l'élimination prévue. Le taux d'élimination peut être définie comme une des contraintes du système. Parmi les autres contraintes, on peut citer la conservation des alignements entre objets, ou naturellement la sélection en fonction des gabarits.

Publications

[BARILLOT 99] X. Barillot : *Généralisation automatique du linéaire : quelques outils pour mesurer la forme des routes*, 19th ACI/ICA Conference, Ottawa'99, Canada, laboratoire COGIT, IGN-SR 990050/S-COM, 1999.

[FRITSCH 99] E. Fritsch : *Road Selection for Generalisation based on a Traffic Modelling*, soumis à Geocomp, laboratoire COGIT, IGN-SR 990052/S-COM, 1999.

[FRITSCH, LAMY 99] E. Fritsch & S. Lamy : *Algorithmes de généralisation basés sur le lissage de la courbure*, 19th ACI/ICA Conference, Ottawa'99, Canada, laboratoire COGIT, IGN-SR 990049/S-COM, août 1999.

C.3.8 Apprentissage d'une base de règles pour la généralisation

Sébastien Mustière

Contexte - objectifs

Cette action de recherche, débutée en 1999, a pour but d'étudier la capacité des techniques d'apprentissage automatique développées en Intelligence Artificielle (IA) à acquérir les connaissances procédurales nécessaires à l'automatisation de la généralisation.

Autrement dit, des algorithmes de généralisation efficaces ont été développés au laboratoire COGIT, l'automatisation du processus de généralisation nécessite maintenant de savoir quand (sur quel objet, dans quel ordre) et comment utiliser ces algorithmes (avec quels paramètres). Nous tentons de répondre à ces questions par apprentissage automatique.

Travaux effectués

Acquisition de compétences en IA

Une grande partie du travail effectué a été consacrée à la compréhension des techniques d'apprentissage utilisées en IA. Une étude a permis de réaliser un recensement des techniques et algorithmes les plus courants en apprentissage automatique (réseaux de neurones [RUMELHART 86], arbres de décision [QUINLAN 86], règles [COHEN 95]), ainsi que des techniques moins courantes (algorithmes flous, algorithmes basés sur des représentations complexes des données, méthodes hybrides [MITCHELL 97]).

Notre étude nous a poussé à utiliser des algorithmes d'apprentissage à partir d'exemples représentés sous la forme de vecteurs attributs/valeurs, c'est-à-dire d'utiliser les algorithmes les plus classiques dont les capacités sont bien connues.

Premiers tests

Des premiers tests d'apprentissage ont été effectués sur une base d'exemples constitués d'un ensemble d'objets géographiques décrits par :

- d'une part, un ensemble de mesures de forme (issues en particulier des travaux de la thèse de Corinne Plazanet effectuée au laboratoire COGIT),

- d'autre part, du choix, effectué interactivement, de la meilleure opération (lissage, caricature...) à effectuer sur l'objet pour le cartographe pour une carte donnée.

Différents algorithmes d'apprentissage symbolique ont été utilisés sur ces exemples pour essayer d'apprendre des hypothèses (sous la forme d'arbres de décision ou de règles) déterminant la meilleure opération à effectuer en fonction des mesures descriptives.

Des tests ont été réalisés sur les routes et sur les bâtiments. Peu de ces hypothèses obtenues se sont révélées de bonne qualité. Toutes nos études poussent vers la même conclusion : ce ne sont pas les algorithmes d'apprentissage qui sont à remettre en cause, mais d'une part la définition de notre problème, et d'autre part le manque d'expressivité de nos mesures décrivant nos objets géographiques. Ces constatations ont poussées à formaliser plus notre problème.

Formalisation

Sans entrer en détail, la formalisation de notre problème s'appuie sur deux constatations :

- il est impossible d'apprendre la meilleure solution de généralisation car le plus souvent plusieurs solutions sont possibles et deux cartographes différents ne choisissent pas nécessairement la même solution,
- il faut différencier l'acquisition des connaissances d'abstraction (pour décrire les données avec un niveau de détail adapté à nos besoins) et les connaissances de représentation (pour savoir quelles opérations de généralisation effectuer à partir des descriptions abstraites). Ce choix s'appuie d'une part sur les travaux effectués sur les systèmes experts dits de deuxième génération qui séparent les différents types de connaissances manipulées dans la base de règles [THOMAS 96], et d'autre part sur des modèles de manipulation de connaissances qui différencient abstraction et représentation [SAITTA, ZUCKER 98].
- Ceci a conduit à redéfinir le problème d'apprentissage et des tests sont en cours pour valider cette approche.

Intégration des résultats

Les connaissances procédurales acquises par apprentissage doivent être implémentées dans le logiciel LAMPS2 de LaserScan, et plus particulièrement au sein du système AGENT. Des travaux sont en cours pour préparer l'intégration de ces connaissances.

Stage

Bruce Landras et François Lagrange, en étude d'ingénieur à l'École Navale (Brest) ont travaillé durant deux mois sur l'application des réseaux de neurones à l'apprentissage des valeurs paramétriques des algorithmes de généralisation.

Contacts extérieurs

Afin d'acquérir les connaissances en IA nécessaires à cette action de recherche, différents contacts ont été pris auprès de chercheurs spécialistes en apprentissage automatique :

- Monika Sester (Université de Stuttgart, Allemagne) : chercheur en SIG utilisant l'apprentissage automatique pour différents travaux d'enrichissement de bases de données géographiques,
- Lorenza Saitta (Université du Piémont Oriental, Italie) : spécialiste de l'apprentissage symbolique,
- Jean-Daniel Zucker (Université Paris-6, France) : spécialiste de l'apprentissage symbolique.

Références

- [COHEN 95] W. Cohen : *Fast Effective Rule Induction*, in Proceedings of 12th Machine Learning Conference, 1995.
- [MITCHELL 97] T.M. Mitchell : *Machine Learning*, McGraw-Hill International Editions, ISBN 0-07-115467-1, 1997.
- [QUINLAN 86] J.R. Quinlan : *Induction of decision Trees*, Machine Learning 1:81-106, Kluwer Academic Publishers, Boston (USA), 1986.
- [RUMELHART et al 86] D.E. Rumelhart, G.E. Hinton and R.J. Williams : *Learning internal representations by error propagation*, in D.E. Rumelhart et J.L. McClelland (Eds) *Parallel Distributed Processing*, vol. 1, Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- [SAITTA, ZUCKER 98] L. Saitta, and J.-D. Zucker : *Semantic Abstraction for Concept Representation and Learning. Symposium on Abstraction, Reformulation and Approximation (SARA'98)*, Asilomar Conference Center, Pacific Grove, California, 1998.
- [THOMAS 96] J. Thomas : *Vers l'intégration de l'apprentissage symbolique et l'acquisition de connaissances basée sur les modèles : le système ENIGME*, thèse d'université, Université P. & M. Curie, décembre 1996.

Publications

[LAGRANGE et al 00] F. Lagrange, B. Landras & S. Mustière : *Machine Learning Techniques for Determining Parameters of Cartographic Generalization Algorithms*, ISPRS, à paraître, laboratoire COGIT, IGN-SR 00-016/S-COM-FL, 2000.

[LANDRAS, LAGRANGE 99] B. Landras & F. Lagrange : *Application des réseaux de neurones à l'apprentissage des valeurs paramétriques des algorithmes de généralisation*, rapport de Stage, École Navale, laboratoire COGIT, IGN-SR 990024/S-STA, octobre 1999.

[MUSTIÈRE et al 99] S. Mustière, J.-D. Zucker J.-D et L. Saitta : *Cartographic Generalization as a Combination of Representing and Abstracting Knowledge*, in Actes de ACM/GIS'99, Texas, USA, laboratoire COGIT, IGN-SR 990055/S-COM, novembre 1999.

[MUSTIÈRE et al 00] S. Mustière, J.-D. Zucker J.-D et L. Saitta : *Abstraction et Changement de Langage pour Automatiser la Généralisation Cartographique*, in Actes de RFIA'2000 (Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle), laboratoire COGIT, IGN-SR 00-001/S-COM-SM, 2000.

C.4.1 Le Repère International de Référence Terrestre (ITRF)

Zuheir Altamimi et Claude Boucher

Contexte

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

Objectifs

L'objectif principal de cette activité est l'amélioration continue de l'ITRF afin de satisfaire toutes les exigences de qualité des produits scientifiques de l'ITRF, utilisés par la communauté internationale. Les principales actions menées en 1999 sont celles liées à l'élaboration et l'analyse de l'ITRF97. L'ITRF97 a été obtenu en combinant quatre solutions VLBI, cinq SLR, six GPS, trois DORIS et une solution multitechnique (SLR + DORIS), contenant à la fois des positions et des vitesses de près de cinq cent vingt-cinq stations réparties sur plus de trois cents sites (voir figure C.4.1.1). La figure C.4.1.2, montre les erreurs formelles des positions et vitesses des stations de l'ITRF97, indiquant que la qualité de l'ITRF97 est au moins identique, sinon meilleur (en particulier en positions) que l'ITRF96.

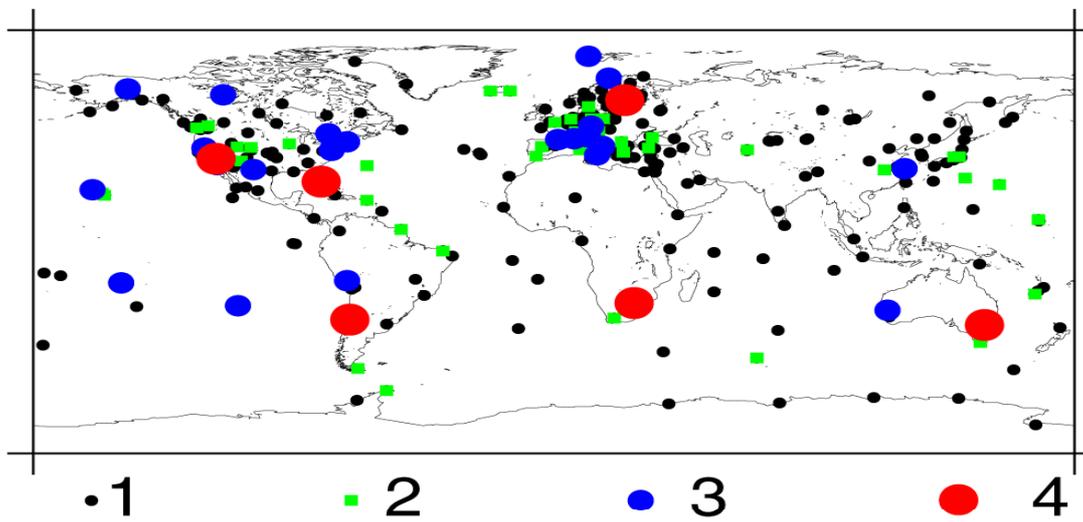


figure C.4.1.1

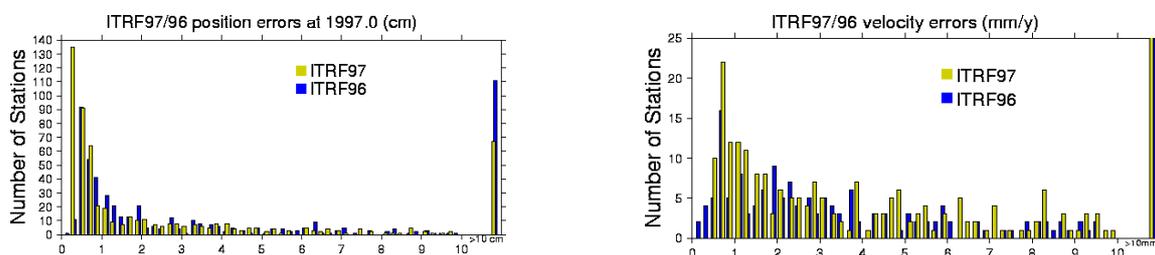


figure C.4.1.2 : erreurs formelles en positions et vitesses

Suite

L'année 2000 sera consacrée aux analyses des solutions nouvelles soumises en vue de l'établissement de l'ITRF2000. Cette référence globale comprendra, en plus des stations primaires VLBI, SLR, GPS et DORIS des stations de densification de réseaux régionaux GPS, en particulier.

Publications

[ALTAMIMI, BOUCHER 99a] Z. Altamimi & C. Boucher : *Recent Results of the International Terrestrial Reference Frame*, in Proceedings of the International Workshop on Geodetic Measurement by collocation of Space Techniques On Earth-GEMSTONE, pp. 15-20, CRL, Koganei, Tokyo, Japan, IGN/LAREG, 1999.

[ALTAMIMI, BOUCHER 99b] Z. Altamimi & C. Boucher : *Scale Consistency between VLBI, SLR, GPS and DORIS Estimated Terrestrial Reference Frames*, International Symposium on GPS, Tsukuba, Japon, pp. 18-22 octobre, IGN/LAREG, 1999.

[ALTAMIMI et al 99] Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *ITRF97 and quality of IGS reference*, in Proceedings of the IGS Analysis Workshop 1999, SIO, La Jolla, USA, IGN/LAREG, 1999.

[BOUCHER et al 99] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *The 1997 International Terrestrial Reference Frame (1997)*, IERS Technical Note 27, Observatoire de Paris, IGN/LAREG, 1999.

C.4.2 Traitement de données GPS en Antarctique : mouvements crustaux, rebond post-glaciaire et systèmes de référence

Marie-Noëlle Bouin

Contexte - objectifs

Il s'agissait de la fin d'un travail de thèse entrepris en 1995, en coopération avec le laboratoire de Géologie de l'École Normale Supérieure (Paris). L'objectif de cette étude était de traiter les données des stations GPS permanentes en Antarctique et dans la zone environnante, pour mesurer des mouvements verticaux et horizontaux relatifs à du rebond glaciaire.

Ces mouvements dits "glaciaires" peuvent se répartir en deux groupes, selon qu'ils sont provoqués par les effets - encore sensibles actuellement - de la réponse de la Terre à la diminution de l'épaisseur de glace de la calotte Antarctique depuis le dernier maximum glaciaire (18 000 ans), ou par les effets plus immédiats de la réaction élastique de la croûte et du manteau aux variations actuelles de la calotte.

Les mouvements glaciaires résultant d'une réaction terrestre très retardée à la fonte survenue il y a plusieurs milliers d'années sont intéressants à plusieurs titres. D'une part, ils permettent après une inversion d'affiner la connaissance actuelle qu'ont glaciologues et géophysiciens [DENTON et al 91] [LINGLE, CLARK 79] de l'historique de la dernière déglaciation en Antarctique. En effet, les enregistrements directs dont on dispose sont insuffisants pour contraindre valablement le comportement de la calotte durant les derniers milliers d'années.

Les modèles récents et complets de déglaciation, tels [TUSHINGHAM, PELTIER 91] ou [PELTIER 94] résultent déjà d'une inversion, à partir d'enregistrements indirects du rebond glaciaire, typiquement des enregistrements de variations relatives du niveau des mers répartis sur toute la surface du globe.

La détermination fiable et précise de mouvements crustaux actuels peut apporter une contrainte supplémentaire aux modèles déjà existants. D'autre part, la réponse de la croûte terrestre est influencée non seulement par l'histoire glaciaire et sa chronologie, mais aussi par les caractéristiques de la Terre solide : épaisseur de la couche élastique (lithosphère) qui surmonte le manteau visqueux, répartition et valeur de viscosité à l'intérieur du manteau.

Ces paramètres dits rhéologiques sont paradoxalement encore très mal connus. Les géophysiciens utilisent donc bien souvent les inversions de modèles de rebond post-glaciaire reposant sur des données suffisamment contraintes (comme les enregistrements de variation du niveau des mers sur des plages coralliennes) pour affiner leur connaissance de la rhéologie terrestre.

On peut ainsi espérer améliorer notre connaissance de certaines caractéristiques mécaniques terrestres à partir de mesures précises des mouvements actuels de la croûte, provoqués par la fonte de la calotte antarctique il y a plusieurs milliers d'années. Les mouvements de rebond visqueux, tels qu'obtenus par [JAMES, IVINS 98] à partir des modèles ICE-3G [TUSHINGHAM, PELTIER 91] ou ICE-4G [PELTIER 94], sont de cinq à dix millimètres/an en surrection sur l'ensemble des côtes de l'Antarctique Est comme Ouest, accompagnés d'un très léger étalement visqueux uniforme (un à deux millimètres/an) sur toute la superficie du continent.

À ces mouvements visqueux retardés viennent s'ajouter les réactions instantanées aux variations légères actuelles de l'épaisseur de la calotte antarctique, dues à l'élasticité de la lithosphère et du manteau. L'enjeu d'une bonne contrainte de ces mouvements, par une mesure géodésique précise, est énorme. En effet, la connaissance qu'ont les glaciologues du comportement actuel de la calotte antarctique est très parcellaire.

Les mesures directes de variation de l'épaisseur de glace ne sont possibles que très localement [RIGNOT 98], les études de bilan de masse sur l'ensemble de la calotte, comme [BENTLEY, GIOVINETTO 91] ou [JACOB et al 92], aboutissent à des estimations où les barres d'erreurs dépassent les chiffres eux-mêmes.

Le seul moyen actuel de contraindre ce genre de bilan global consiste à calculer la quantité de glace venant s'ajouter à la calotte pré-existante, d'une part, (accumulation provenant des précipitations) et le taux d'ablation, d'autre part, (fonte due à la température atmosphérique, ablation sous-forme d'icebergs par l'intermédiaire des plates-formes). Mesurer les mouvements élastiques de rebond devrait permettre de lever des incertitudes.

Le comportement de la calotte Est par exemple (portion terrestre) où les températures restent inférieures à 0° C toute l'année, est susceptible de déboucher sur une très légère surrection (due à une augmentation légère du vêlage d'icebergs) ou une très légère subsidence (due à une augmentation du taux de précipitations).

Sur l'Antarctique Ouest (portion marine), et en particulier, la Péninsule, qui est la région la plus chaude du continent, la tendance récente devrait être à une accélération de la fonte plutôt que des précipitations, donc une surrection. Savoir si la Péninsule fond effectivement, et à quelle vitesse, est un débat qui passionne les glaciologues, et auquel une mesure des mouvements élastiques locaux pourrait apporter une réponse.

Les mouvements attendus d'après [JAMES, IVINS 95] et [JAMES, IVINS 98] sont du même ordre de grandeur que ceux dus au rebond visqueux à long terme, soit de quelques millimètres par an à plus d'un centimètre par an, avec la possibilité de fortes disparités locales.

La connaissance du comportement actuel de la calotte conditionne aussi celle de l'évolution à court terme du niveau des mers. Un réchauffement important se traduisant par une fonte plus rapide que prévue de la Péninsule ou d'une bonne partie de l'Antarctique Ouest pourrait provoquer une élévation de trois à cinq mètres du niveau des mers, avec des conséquences tragiques pour l'écosystème et la survie des populations.

Activités

Traitement de données GPS

Nous avons choisi, compte tenu de la faible amplitude des mouvements que nous cherchions à détecter, de traiter des données continues, en provenance des stations IGS en Antarctique, Amérique du Sud, Australie, et sur les diverses îles entourant l'Antarctique elle-même.

L'intérêt d'inclure des stations extérieures à l'Antarctique est de permettre un rattachement fiable du réseau à un système de référence (ITRF), donc de disposer de vitesses absolues, d'une part (et pas seulement de vitesses relatives

entre les différents points du réseau) et de pouvoir comparer nos résultats à d'autres résultats de géodésie spatiale, d'autre part.

Les données des stations IGS sont de bonne qualité sur plusieurs aspects (continuité effective des données sur plus de quatre ans, bonne stabilité des horloges des récepteurs), ce qui est un avantage certain compte tenu de la difficulté de la tâche. Ces données sont, pour la plupart, déjà incluses dans les calculs IGS utilisés dans les solutions combinées (production des orbites IGS) participant à la solution multitechnique de l'ITRF. Malgré cela, il est intéressant de les traiter de manière indépendante, avec un processus de traitement soigné et adapté aux objectifs géophysiques de l'étude.

On a constaté que la situation géographique particulière du réseau, centré sur le Pôle Sud, entraînait un certain nombre de spécificités et de désagrément, qu'il est nécessaire de contourner par une méthodologie appropriée. On peut citer en vrac la configuration particulière des orbites GPS au dessus de l'Antarctique, l'activité ionosphérique très intense quelle que soit la période dans le cycle solaire, l'étendue du réseau résultant en lignes de base jusqu'à plus de 10 000 km.

Le réseau comprenait au début de notre traitement, en 1995, onze stations, dont quatre sur le continent antarctique lui-même. En 1997 et 1998, l'intérêt croissant de la communauté des sciences de la Terre pour la géophysique et la glaciologie de l'Antarctique a débouché sur l'installation de trois nouvelles stations sur le sol antarctique, dont une sur la glace, qui ne peut donc servir à des études de géodésie, mais permet de quantifier le mouvement de la calotte elle-même au Pôle Sud, et une station sur une des îles environnant le continent.

Ces stations ont été, au fur et à mesure, incluses dans notre calcul. En 1997, une demande de crédit auprès de l'IFRTP (Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaire, Brest) a permis l'installation d'une station GPS permanente supplémentaire à Dumont d'Urville. Cette station fonctionne de manière très satisfaisante depuis décembre 1997, grâce à la maintenance de l'IFRTP. Ses données sont incluses dans notre étude, ainsi que les données des campagnes SCAR 1995 et 1996 qui ont été réalisées sur le même point.

Quatre ans de mesures continues ont donc été traitées à l'aide du logiciel scientifique GAMIT [KING, BOCK 93], en réseau libre et selon des paramètres de calcul classiques : sessions de vingt-quatre heures, orbites IGS fixes (après un essai de réévaluation locale des orbites destiné à compenser la mauvaise qualité relative des orbites IGS dans l'hémisphère Sud), inversion sur toutes les lignes de base, évaluation d'un paramètre de retard troposphérique toutes les trois heures, angle de coupure en élévation à 15°.

La longueur moyenne des lignes de base très importantes (plusieurs milliers de kilomètres, toutes les lignes de base sont comprises entre 1 000 et plus de 10 000 km) empêche la résolution des ambiguïtés entières, les solutions utilisées sont donc les solutions avec ambiguïtés libres.

Rattachement à un système de référence

Les résultats issus du calcul GPS en réseau libre sont relatifs à un système de référence propre bien défini, qui est grossièrement celui implicitement fourni par les orbites IGS fixes. Par contre, ce système de référence n'est pas nécessairement stable d'une session à l'autre, a fortiori sur l'ensemble d'une série temporelle de plus de quatre ans. Il faut donc rattacher la solution libre à un système de référence existant par ailleurs. Pour cela, plusieurs tactiques sont envisageables.

Elles passent toutes par une transformation sur les jeux de coordonnées obtenus à l'issue de la solution libre, vers le système de référence en question (ITRF) portant sur les sites communs aux deux ensembles (dans notre cas quasiment tous puisqu'à l'exclusion des sites antarctiques installés tardivement ou de Dumont, il s'agit de stations IGS). Une première stratégie implique un comportement linéaire pour le déplacement d'un certain nombre de sites au moins.

On utilise alors un filtre de Kalman pour rattacher l'ensemble de la série temporelle aux sites correspondants dans le système de référence, avec des contraintes par rapport aux positions et aux vitesses de ces points. Les positions des stations qui ne sont pas utilisées comme stations de référence sont "libérées" par l'introduction de paramètres stochastiques dans une solution inverse, qui permet de retrouver des positions successives à partir du jeu position-vitesse linéaire valable pour l'ensemble de la série.

Le gros inconvénient de cette technique est que les stations de référence deviennent inutilisables pour une interprétation géophysique des résultats, puisque leurs position-vitesse sont réduites (aux contraintes près) à celles des stations correspondantes dans l'ITRF. Pour cela, nous avons préféré des stratégies de rattachement jour après jour, auquel cas on obtient des sessions successives individuellement rattachées au même système de référence.

On peut pour cela utiliser également un filtre de Kalman : on rattache les positions successives de la position libre aux positions correspondantes dans l'ITRF, avec des contraintes plus fortes sur les stations dites de référence. La solution ainsi obtenue est dépendante du choix des stations de référence.

On a choisi ici les trois sites IGS de Hobart, Kerguelen et Santiago du Chili, à la fois pour leur qualité géodésique selon les critères ITRF (classées stations de catégorie B dans l'ITRF 96 [ALTAMIMI 98]) et pour leur répartition géographique par rapport à l'ensemble du réseau. Un test effectué avec un autre jeu de référence montre que la solution n'en est pas indépendante.

Une autre méthode consiste à combiner, jour après jour, la solution libre avec les positions successives extrapolées de l'ITRF, à l'aide d'une transformation à sept paramètres, effectuée sur l'ensemble du réseau, avec les matrices de variances-covariances complètes issues de l'inversion GPS.

L'utilisation des matrices complètes garantit de tenir compte de toutes les corrélations, entre les différentes composantes des coordonnées d'un même point, mais aussi d'un site à l'autre. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel CATREF [SILLARD, ALTAMIMI 98], développé pour la combinaison de jeux de coordonnées multi-techniques aboutissant à la production de l'ITRF. Cette méthode présente le double avantage de ne pas déformer les lignes de base, la transformation à sept paramètres portant sur l'ensemble du réseau, et d'être quasiment indépendante du choix des stations de référence.

C'est elle qui a été retenue pour la production de la solution rattachée qui donne ensuite lieu à l'interprétation géophysique. La solution ITRF retenue au départ était l'ITRF 96, en cohérence avec le système de référence terrestre dans lequel sont calculées les orbites IGS à partir de juin 1997. Dans un second temps, la solution ITRF 97 étant disponible, et apportant une amélioration sensible sur cette région du monde (séries temporelles utilisées plus longues, plus grand nombre de stations), nous avons finalement choisi de rattacher notre solution à l'ITRF 97. C'est cette solution rattachée ENS 97 qui donne ensuite lieu à l'interprétation géophysique.

Interprétation géophysique des résultats

Le but premier de cette étude était l'obtention de mesures de déplacements verticaux, associés au rebond glaciaire. La moins bonne précision de la composante verticale nous pousse à nous intéresser également aux mouvements horizontaux, qui sont un sous-produit très important de notre travail.

C.4.3 Élaboration d'une série temporelle de l'ITRS

Patrick Sillard

Ce travail vise principalement à comprendre les implications d'un changement de représentation de réalisation de systèmes de référence terrestre : les positions et vitesses constantes de stations, sont aujourd'hui remplacées par des séries temporelles de positions de stations.

La géodésie spatiale permet désormais d'accéder à des positions de stations quasiment en continu dans le temps avec une précision de positionnement sub-centimétrique. C'est une donnée nouvelle. Il a encore cinq ans, il fallait en moyenne une semaine à un mois minimum, pour atteindre un positionnement sub-décimétrique. C'est aussi une évolution majeure pour les systèmes de référence car la description de la position d'une station dans le temps devient partiellement inconnue car imprévisible.

En effet, dans le passé, et c'est encore le cas dans l'ITRF, les positions de stations étaient descriptibles *via* une modélisation très simple de type position à un instant donné et vitesse constante dans le temps. Aujourd'hui, la série temporelle à laquelle on accède ne permet plus de considérer la modélisation précédente comme une représentation adéquate de la position de la station. Tout juste est-il possible de considérer le couple position-vitesse comme une représentation moyenne de la position. En termes de systèmes de référence, l'usage d'une série temporelle se heurte encore à de nombreux problèmes.

Dans cette action de recherche, deux angles ont été choisis : d'une part, intégrer des séries temporelles de techniques différentes dans une réalisation de système terrestre unique et stable dans le temps ; d'autre part, comprendre la nature des bruits (autocorrélation, en particulier) présents dans une série temporelle et dont l'ignorance peut être assimilée à une faute de traitement, tant les résultats peuvent s'en trouver modifiés.

Élaboration d'une série temporelle de l'ITRS

Cette partie de travail est intégrée dans la participation de l'IGN à une expérience pilote du service international de la rotation de la Terre coordonnée par Patrick Sillard. Elle a donné lieu au développement d'un logiciel de combinaison qui permet, pour la première fois, d'intégrer la rotation de la Terre au calcul du système terrestre. Les premiers résultats ont été présentés à l'AGU fall Meeting (SILLARD 99).

Les résultats sont aussi disponibles sur le site <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRSTS>.

La suite de ce travail consiste à montrer l'intérêt scientifique de tels produits et suppose donc le traitement d'un grand nombre de données. La difficulté réside en partie dans l'absence de telles données à l'heure actuelle. Les centres de traitement de données de géodésie spatiale sont eux aussi en pleine mutation et ce type de données (séries temporelles de positions de stations et paramètres d'orientation de la Terre) devrait se généraliser. Ce n'est pas encore le cas actuellement.

Étude théorique du bruit de mesure

Cette partie du travail s'est concentrée sur la prise en compte d'éventuelle autocorrélation des séries temporelles de positions de stations. Il a été montré par Zhang [ZHANG 97] : l'existence d'une corrélation dans le temps sur les déterminations de positions successives par la technique GPS.

Les premiers traitements sur DORIS, effectués dans le cadre de cette étude montre des phénomènes comparables. À l'heure actuelle, les centres de traitement de géodésie spatiale négligent ces phénomènes. Or, des premières études montrent que cette négligence peut conduire à des déterminations de vitesses tectoniques d'une précision nettement optimiste, pouvant aller jusqu'à un facteur 10 pour DORIS (en écart-type).

La difficulté tient essentiellement à l'identification des causes physiques de variation du signal. Par exemple, une position de station présente des variations annuelles et semi-annuelles. Il y a des causes physiques à cela, néanmoins de telles variations peuvent également être le fait de corrélations à court terme convoluées avec l'échantillonnage choisi (un mois, une semaine).

D'autres phénomènes de nature purement stochastique peuvent également entrer en jeu, de sorte que le problème est insoluble sans passer par la comparaison de signaux provenant de techniques différentes. C'est l'esprit de la première partie de ce travail. Pour ces deux axes d'études précédents, l'année 2000 devrait apporter des résultats significatifs.

Référence

[ZHANG et al 97] J. Zhang, Y. Bock, H. Johnson, P. Fang, S. Williams, J. Genrich, S. Wdowinski & J. Behr : *Southern California Permanent GPS Geodetic Array : Error analysis of daily position estimates and site velocities*, in Journal of Geophysical Research, vol. 102, B8, pp. 18035-18055, 1997.

Publication

[SILLARD 99] P. Sillard, C. Boucher & Z. Altamimi : *The IERS time series pilote experiment, AGU fall meeting*, December 1999, IGN/LAREG, 1999.

C.4.4 Amélioration des processus de compensation des données de nivellement

Patrick Sillard

Cette étude vise à mieux comprendre les systématismes du nivellement par retour à l'analyse des observations de dénivelées. Le premier objectif est la mise en valeur du patrimoine français en la matière : trois réseaux successifs ont été mesurés (Bourdaloue 1860, Lallemand 1900-1930 et IGN69, après la guerre).

Ces données représentent une masse considérable d'information sur la déformation du territoire, aujourd'hui sous-exploitée.

La seule connaissance des altitudes compensées n'est certainement pas satisfaisante pour des travaux scientifiques. Il s'agit donc de développer une expertise dans ce domaine.

Par ailleurs, des travaux sont menés au niveau européen (sous-commission EUREF de l'association internationale de géodésie) pour la réalisation de systèmes altimétriques cinématiques basés sur des mesures de nivellement (détermination d'altitudes et variations temporelles). Une participation française est souhaitable et nécessaire, outre la saisie des données, la capacité de participer aux calculs qui seront menés.

Dans le domaine de la recherche, le développement d'un logiciel de compensation de nivellement cinématique était prévu. Ce développement n'est pas encore entamé. Par contre, en parallèle de l'action de recherche, des opérations de saisie d'observation du premier ordre NGF-IGN69 ont été menées. À ce jour, 9 337 km de nivellement de premier ordre IGN69 sont saisis, et la saisie du premier ordre devrait être achevée courant 2000, au Service de Géodésie et de Nivellement (SGN) de l'IGN. Le second ordre IGN69 et le nivellement Lallemand suivront alors.

C.4.5 Mesures de déformation dans les Alpes

Thierry Duquesnoy

Contexte

En 1993, un réseau de stations GPS a été réalisé grâce à la coopération entre plusieurs laboratoires et instituts dont l'IGN, afin d'étudier la déformation actuelle des Alpes Occidentales. Une réitération de ce réseau s'est déroulée au début de l'été 1998, soit cinq ans après la première mesure. Cela devrait permettre de quantifier, pour la première fois, la déformation dans cette région.

Objectifs

Les objectifs scientifiques majeurs sont de quantifier la part de convergence Europe-Asie qui est absorbée dans les alpes et de déterminer les zones de déformation actives à l'intérieur de la chaîne des alpes.

Suite

Trois solutions distinctes ont été calculées par trois centres différents, le LGCA de Chambéry, l'ENS Paris et l'IGN en utilisant des stratégies de calcul différentes et deux logiciels de traitement différents. La comparaison des solutions des trois centres de calcul ont montré une grande cohérence entre les différentes solutions pour la mesure de 1998.

En effet, la différence moyenne sur les longueurs entre les solutions ENS-IGN est de 2 mm, tandis que la différence moyenne entre les solutions ENS-LGCA est aussi de l'ordre de 2 mm. La concordance des coordonnées finales des solutions ENS-IGN dans le même référentiel est de 1,7 mm, 1,9 mm et 19,9 mm sur les composantes nord est et altimétrique respectivement.

En revanche, il subsiste encore quelques différences pour le traitement de la campagne de 1993. En particulier, la comparaison entre les solutions IGN et ENS sont cohérentes sur les stations locales du réseau alpes, cohérente sur les stations de référence IGS mais non cohérente sur l'ensemble station IGS et stations locales. Des traitements complémentaires sont donc en cours. Concernant les résultats finaux et leur interprétation. Quatre points du réseau avait des déplacements particuliers. Il a été rapidement constaté que ces quatre points avaient été mesurés en 1993 par un même couple d'antennes et uniquement par ce couple d'antennes.

Une calibration de la quasi totalité des antennes utilisées en 1993 a donc été effectuée en juillet 1999. Malheureusement une des deux antennes n'a pu être calibrée. En revanche, la calibration sur la deuxième antenne a montré un systématisme de 9 mm sur la composante est et 5 mm sur la composante nord. Ces résultats doivent encore être affinés, mais tenir compte de ce systématisme annule quasiment le déplacement sur les points mesurés avec cette antenne. Il paraît donc nécessaire de calibrer au plus vite la deuxième antenne.

Publications

[CALAIS et al 99] E. Calais, E. Barroux, R. Bayer, O. Bellier, N. Béthoux, C. Champion, J. Chéry, P. Choukroune, G. Clauzon, F. Cotton, F. Mathieu, E. Doerflinger, T. Duquesnoy, J. Fréchet, J.-F. Gamond, J.-C. Hypolite, F. Jouanne, J. Martinod, L. Serrurier, J.-F. Stéphan, C. Sue, M. Tardy, F. Thouvenot, P. Tricard, G. Vidal, T. Villemin & C. Vigny : *Present-day strain field in the Western Alps, Colloque Geofrance3-D*, Lyon (F), novembre 1999.

[VIGNY et al 99] C. Vigny, T. Duquesnoy, F. Jouanne, J. Ammann, M. Anzidei, J.-P. Avouac, F. Barlier, R. Bayer, P. Briole, E. Calais, J. Chéry, F. Cotton, F. Duquenne, K. Feigl, M. Flouzat, J.F. Gamond, A. Harmel, F. Jouanne, M. Kasser, M. Laplanche, M. Le Pape, J. Martinod, G. Ménard, B. Meyer, J.-C. Ruegg, J.-M. Scheubel & G. Vidal : *Western Alps Crustal Deformation Monitored by Repeated GPS Surveys*, AGU'99, décembre 1999.

C.4.6 Nivellement par GPS

Olivier Bock

Contexte scientifique

La précision de positionnement différentiel par GPS en mode géodésique est fondamentalement limitée par la configuration géométrique des mesures, par l'instrumentation elle-même et par la propagation dans l'atmosphère. La première est liée d'une part à la visibilité des satellites [SANTERRE 91] qui dépend de la position sur le globe et, d'autre part, au multi-trajets des ondes près des récepteurs au sol [ELOSEGUI et al 95].

Nous avons proposé une voie d'étude instrumentale pour réduire les multi-trajets (synthèse d'ouverture par mise en réseau de plusieurs récepteurs GPS) qui sera traitée dans une autre action de recherche en 2000.

La principale source d'erreur d'ordre instrumental est actuellement liée à l'incertitude sur le centre de phase des antennes employées. Là aussi, il y a une possibilité de réduction des erreurs en réalisant une cartographie précise de la phase des antennes permettant de corriger les mesures. Cette approche a déjà été mise en œuvre et devrait se généraliser. Il faut aussi mentionner les incertitudes sur les orbites des satellites qui interviennent dans une plus faible mesure car des orbites précises mises à disposition par l'IGS peuvent être utilisées pour les calculs.

La dernière source d'erreur concerne le retard de propagation des ondes radio (allongement troposphérique, AT) dans l'atmosphère due à l'indice de réfraction de l'air. C'est cette erreur qui limite principalement la composante verticale en GPS. Plusieurs équipes dans le monde travaillent sur l'amélioration de la correction de cet effet depuis une dizaine d'années. Toutefois, des approfondissements à caractère instrumental et méthodologique sont nécessaires avant d'envisager l'emploi du GPS pour faire de l'altimétrie de précision.

Nous avons engagé des travaux de recherche dans ce sens à l'IGN en 1998 qui ont été poursuivis en 1999, en collaboration avec l'ESGT (O. Bock et M. Kasser), le Service d'Aéronomie du CNRS (J. Pelon) et le laboratoire de Géophysique de l'Université de Montpellier (E. Doerflinger et R. Bayer).

Travaux menés en 1999

Trois actions ont été menées cette année, notamment dans le cadre du stage de DEA de B. Escalbert, qui seront poursuivies par la thèse de J. Tarniewicz (au laboratoire OEMI), co-dirigée par Michel Kasser du Service de Géodésie et du Nivellement (SGN) de l'IGN et J. Pelon du Service d'Aéronomie.

- Une étude bibliographique sur les travaux déjà effectués sur la correction de l'AT en GPS, sur les différentes techniques de sondage de la vapeur d'eau (principale source d'incertitude sur l'AT) et sur la distribution de l'humidité dans l'atmosphère.
- Une quantification des inhomogénéités spatiales et des variations temporelles de l'air sec et de l'humidité dans la basse atmosphère à l'aide de radiosondages (fournis par le SA) et de mesures effectuées avec le lidar Raman CART dans le cadre du projet ARM de la NASA (données fournies par D. Turner).
- La réalisation de mesures GPS dans les Alpes (Milan, Italie), où se déroulait une campagne internationale d'observations météorologiques (MAP), durant le mois d'octobre 1999, dans l'objectif d'étudier l'amélioration de la précision en altimétrie GPS par l'adjonction des mesures de vapeur d'eau réalisées simultanément par lidar différentiel, radiosondages et données d'analyse météorologique à petite échelle.

Résultats

Les méthodes de correction de l'allongement troposphérique

L'incertitude sur l'AT est celle qui limite le plus sévèrement l'estimation de la composante verticale, à l'heure actuelle. Une erreur donnée sur l'AT produit une erreur de 2,6 à 4,2 plus importante sur la composante verticale, aux latitudes moyennes. En positionnement différentiel, c'est l'erreur différentielle sur l'AT qui intervient. Cette dernière est d'autant plus importante que la dénivelée entre les stations importantes et que la base est longue.

En général, une grande durée d'observation permet d'améliorer la précision des observations, mais une erreur moyenne difficile à évaluer peut subsister. De plus, lors de passages de fronts météorologiques les mesures peuvent être très fausses.

L'incertitude sur l'AT provient principalement de par sa forte sensibilité à la vapeur d'eau. Cette dernière étant très inhomogène et fortement variable dans la troposphère, sa modélisation précise est difficile. Deux approches ont été utilisées dans le passé pour la correction de l'AT, s'inspirant des méthodes et techniques élaborées auparavant pour la VLBI et le SLR.

La première approche consiste à faire une correction *a priori* précise l'AT avant le calcul des positions des stations GPS. Pour cela, on réalise des mesures et / ou on utilise des modèles et des valeurs standard au sol. L'utilisation de seuls modèles est mise en défaut facilement lors de conditions météorologiques défavorables (ce point est développé ci-dessous). L'utilisation de mesures est plus fiable. La mesure de la pression au sol permet de corriger environ 90% de l'AT au zénith (~ 2,30 m), dans l'hypothèse de l'équilibre hydrostatique.

Les 10% restants (5–20 cm) sont liés à la distribution de vapeur d'eau et de température depuis le sol jusqu'à environ 5 km d'altitude. La méthode de sondage la plus couramment employée est la radiométrie à micro-ondes. Celle-ci ne fournit cependant qu'un contenu intégré de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

De très bons résultats ont été obtenus pour des bases courtes et avec des instruments pouvant réaliser des mesures dans les directions des différents satellites au moment de leur passage : 2,6 mm pour 50 km [WARE et al 93] et 5 mm pour 180 km [GLAUS et al 95]. Toutefois, ces résultats semblent être des cas particuliers de météo relativement stable, une précision plus courante étant d'environ 1 à 2 cm [DOERFLINGER 97].

La deuxième approche consiste à traiter l'AT comme une inconnue et à l'estimer conjointement avec les positions des stations dans le logiciel de traitement des mesures GPS. La modélisation adoptée pour l'AT est alors cruciale et la précision dépend encore une fois de la variabilité spatiale et temporelle de la vapeur d'eau lors des mesures. Deux modèles sont couramment employés : déterministe et stochastique avec des méthodes de résolution par moindres carrés ou filtrage de Kalman.

Une précision comparable à la première approche est obtenue : 9 mm pour 134 km [DODSON et al 96], où un radiomètre micro-onde a été utilisé pour mesurer la variabilité de la vapeur d'eau et non pas pour corriger directement l'AT.

Toutefois, il semble la précision ne puisse être améliorée significativement dans cette approche à cause de la corrélation de l'AT avec la coordonnée verticale de la station. Les améliorations de correction de l'allongement troposphérique que nous envisageons d'étudier sont d'une part d'ordre instrumental (en particulier au niveau de l'étalonnage des instruments) et, d'autre part, au niveau des modèles météorologiques employés dans les méthodes de calcul. Les deux aspects sont évidemment étroitement liés.

Les techniques de sondage de la vapeur d'eau

Les techniques de télédétection de la vapeur d'eau sont essentiellement la spectro-photométrie IR, la radiométrie micro-ondes et le lidar. Ces techniques peuvent être mises en œuvre depuis le sol, sur avion ou sur satellite. Toutefois, dans le cas d'une observation depuis un avion ou un satellite de bonnes précisions sont obtenues au-dessus des océans. Au-dessus des terres, l'émission thermique du sol rend généralement les radiomètres micro-ondes inutilisables pour cette application.

Dans le domaine visible ou IR, la méconnaissance de l'albédo aux longueurs d'ondes utilisées limite aussi les mesures. Toutefois, des précisions de 5-15 % ont été obtenues sur le contenu intégré [SCHLUESSEL 89], mais celles-ci ne sont pas suffisantes pour une correction *a priori* de l'AT. Des mesures directionnelles effectuées depuis le sol sont donc préférables.

Parmi ces techniques, il faut distinguer celles mesurant des profils (lidar Raman ou à absorption différentielle, radiomètres micro-ondes à 183 GHz et certains spectromètres IR) de celles ne fournissant que des mesures intégrées (radiomètres micro-ondes autour à 22 GHz et la plupart des spectromètres solaires).

La connaissance des profils de vapeur d'eau et de température est préférable pour l'estimation de l'AT, mais une étude plus détaillée de la précision intrinsèque des différentes techniques est nécessaire afin de déterminer laquelle est la plus intéressante. Il faut noter que le contenu intégré, exprimé en épaisseur de vapeur d'eau précipitable (IPW), est converti en AT en appliquant un facteur multiplicatif d'environ 6,5 [ROCKEN et al 91].

L'évaluation de l'exactitude des mesures d'humidité dans l'atmosphère est extrêmement difficile dès lors que l'on approche les faibles teneurs en vapeur d'eau. En particulier, il est reconnu que les radiosondes utilisées habituellement ne sont pas fiables pour la mesure des humidités relatives inférieures à 20% [MELFI et al 89] [FERRARE 95]. Ceci pose un réel problème pour l'évaluation des performances d'instruments supposés précis.

En général une comparaison de différents instruments est donc faite (lidar, radiosondes, radiomètres,...), ce qui permet de mettre en évidence des différences moyennes en plus de la précision interne (écart-type).

La spectro-photométrie IR utilise essentiellement le rayonnement solaire direct, mesuré au sol, pour estimer le contenu intégré en vapeur d'eau par absorption différentielle. Deux approches ont été étudiées : la photométrie dans une bande centrée sur 940 nm (spectre large), dont la précision est d'environ 10% [REAGAN 92] et la spectrométrie de la raie à 925 nm. Une précision de 0,75 mm IPW a été obtenue avec cette dernière technique, en très bon accord avec des mesures par radiométrie micro-ondes [SIERK 97].

La radiométrie micro-ondes utilise l'émission thermique de la raie à 22 GHz de la vapeur d'eau [ELGERED 93]. La mesure sur plusieurs fréquences (au moins deux) permet de faire en théorie une mesure absolue et de s'affranchir des autres constituants (eau liquide et oxygène).

Toutefois, ces instruments requièrent un étalonnage permanent du signal (à l'aide de deux sources de température) et sont sensibles aux émissions radio parasites. La précision interne est typiquement de 3 à 5 mm AT, mais des biais de 1-2 cm AT par rapport à des radiosondes, de 3 cm AT entre différents radiomètres et d'environ 1 mm AT pour des instruments identiques, ont été observés.

La technique de lidar Raman est relativement récente [WHITEMAN et al 92]. Elle utilise la rétrodiffusion (non résonnante) inélastique Raman des molécules d'eau (branche Q), qui présente un décalage en fréquence de 3657 cm^{-1} [INABA 76]. Ce décalage étant spécifique au type de molécule, on distingue aisément la vapeur d'eau des autres gaz (azote et oxygène) et des aérosols. Le choix de la longueur du laser employé dépend de l'état de l'art de la technologie (laser et détecteurs).

Deux lidars sont actuellement en opération routinière aux USA : le SRL de la NASA (XeF excimer à 351 nm de nuit et Nd:YAG à 355 nm de jour) et le CART du DOE (Nd:YAG à 355 nm de jour et de nuit). Ils sont toutefois relativement encombrants (télescopes de 76 et 61 cm).

Ces systèmes ont démontré leur capacité à faire des mesures de profils d'humidité avec une précision de 0,1 g/kg jusqu'à 7-8 km d'altitude de nuit et 0,4 g/kg à 5 km d'altitude de jour [GOLDSMITH et al 98].

Des différences moyennes par rapport à des radiomètres de 0,2 à 0,8 mm IPW ont été mesurées [ENGLAND et al 97]. Des systèmes plus compacts, devant permettre des mesures de jour jusqu'à 2-3 km, sont à l'étude (laser Nd:YAG à 266 nm et télescope de 35 cm) [PRASAD, MATHUR 98].

Le lidar Raman semble être la technique la plus prometteuse en terme de précision de mesure et d'adéquation à la correction de l'AT. Toutefois, les systèmes actuels sont encore encombrants et il reste à résoudre un problème majeur : l'étalonnage de l'instrument pour pouvoir faire des mesures absolues d'humidité. Là encore, l'approche traditionnelle consiste à étalonner l'instrument à l'aide d'un radiomètre micro-ondes, d'une radiosonde ou d'un GPS ; instruments dont l'exactitude est inférieure à celle que nous recherchons.

Une approche différente s'impose. Nous envisageons d'étudier l'utilisation d'un spectromètre solaire fournissant une mesure absolue pour l'étalonnage du lidar. La limite ultime est alors modélisation de spectre d'absorption du rayonnement par la vapeur d'eau à la longueur d'onde utilisée. Ces modèles sont encore imparfaits, aussi bien dans le domaine des micro-ondes que dans le domaine visible ou aux longueurs d'ondes des lasers courants [LIEBE 85].

Quantification des inhomogénéités et de la variabilité de l'atmosphère

La hauteur d'atmosphère contribuant à la composante hydrostatique de l'AT au zénith (avec une précision de un mm) est d'environ 50 km, alors qu'elle est de 5 km seulement pour la composante humide. En supposant des visées allant du zénith jusqu'à un angle d'élévation de 30°, cela représente respectivement des distances horizontales d'environ 100 et 10 km. Quant aux durées d'observations en GPS en mode géodésique, elles sont typiquement de quelques jours. L'objectif de mesures précises de l'état de l'atmosphère est également de pouvoir ramener cette durée à quelques heures, voire moins d'une heure.

La quantification des inhomogénéités et de la variabilité de l'atmosphère à ces échelles requiert l'utilisation de techniques de télédétection telles que, le lidar aéroporté ou au sol effectuant des mesures en continu. Les radiosondages n'étant effectués que toutes les douze heures (exceptionnellement toutes les six, voire trois heures, lors d'expérimentations particulières), avec une maille de 200 km, ils ne donnent qu'une vue à relativement grande échelle.

Les radiomètres micro-ondes permettent d'obtenir une information continue sur le contenu intégré en vapeur d'eau et ainsi d'évaluer la variabilité temporelle locale, voire spatiale pour un instrument dépointable. Les profils lidar apportent une information complémentaire sur l'inhomogénéité de l'atmosphère. Ce sont surtout par ces derniers que nous avons cherché à faire cette quantification [ESCALBERT 99].

Nous distinguerons ci-dessous les composantes hydrostatique et humide de l'AT, puisque les échelles spatiales sont différentes. Nous comparerons également les performances des modèles classiques de calcul de l'AT à un calcul précis, basé sur les profils mesurés.

Pour l'analyse de l'AT hydrostatique, nous avons utilisé des radiosondages à six heures d'intervalle de la campagne PYREX (données du Service d'Aéronomie). Nous avons noté une variabilité de 0,4 K/km du gradient vertical moyen de température et de 2 km de la hauteur de la troposphère. Celle-ci induit des erreurs allant jusqu'à 5 cm sur l'AT dans les modèles standard (avec des paramètres au sol de 293 K et 1013 hPa) ou 2,5 cm lorsque la pression au sol est mesurée.

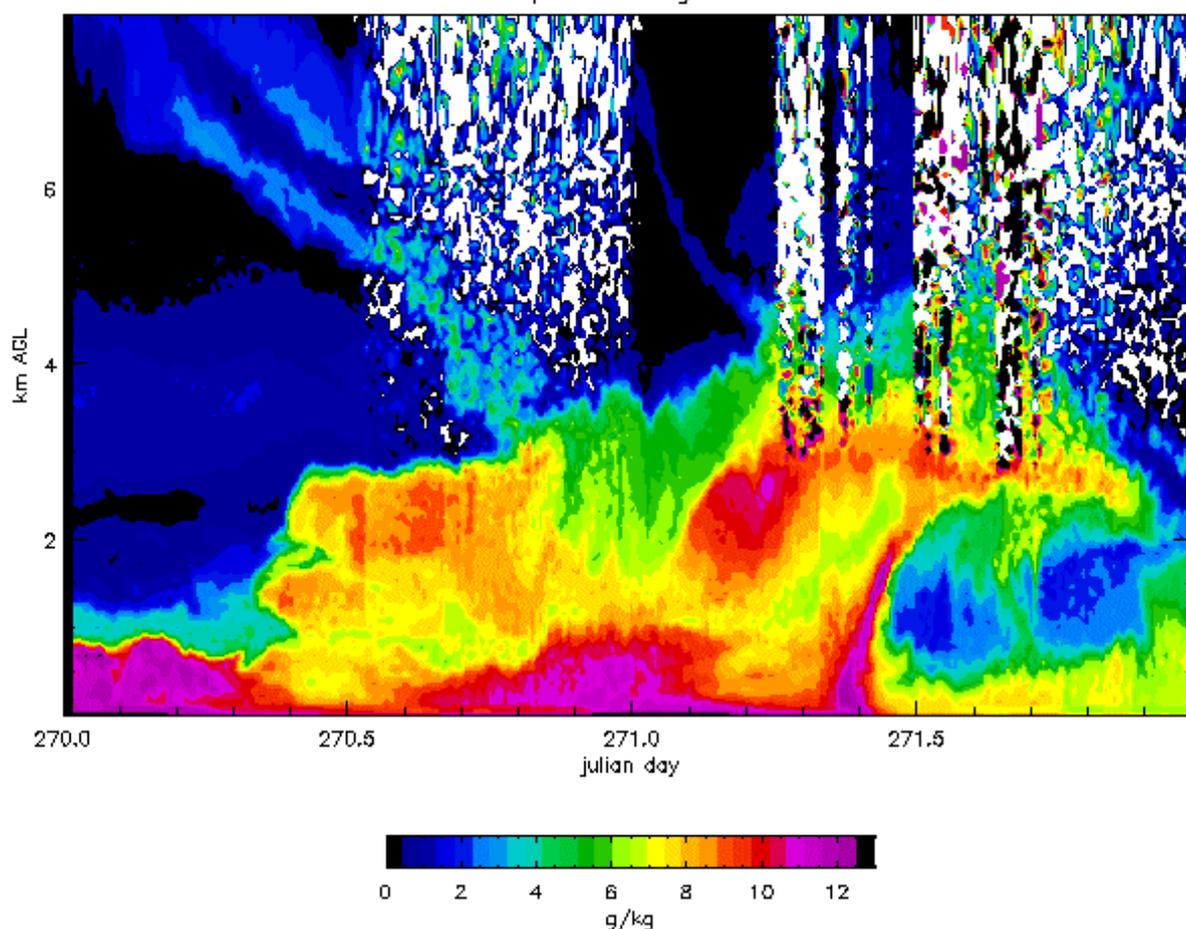
En supposant une information plus dense (fournie par une technique de sondage ou par un modèle d'analyse à méso-échelle), permettant de bien ajuster le gradient vertical et la hauteur de la troposphère, cette erreur est ramenée à 5 mm, voire moins.

Il ne reste alors que les fluctuations à petite échelle, de courte durée de vie, qui provoquent essentiellement une erreur aléatoire. Nous prévoyons de poursuivre cette étude en essayant d'évaluer l'amélioration obtenue en utilisant des modèles d'analyse de type CEPMMT ou MésoNH et/ou des données satellitaires sur la vapeur d'eau intégrée. Pour cela, nous pourrions nous servir des modèles météorologiques qui seront développés suite à la campagne MAP, ainsi que des mesures GPS / lidar que nous avons réalisées lors de cette campagne.

Le principal problème avec le profil de température est qu'il évolue rapidement dans la journée, dans la couche limite. Il est donc possible qu'il faille mesurer, en plus de l'humidité, un profil de température sur les deux premiers km. Ceci est possible en ajoutant un canal supplémentaire au lidar Raman. Il reste toutefois à évaluer la précision attendue.

Nous avons également évalué l'influence des gradients de température entre deux stations de radiosondage, en supposant connue la température connue en l'une des stations. Pour un angle d'élévation de 30°, l'erreur résultante est d'environ 1 mm.

970927 – 970928
Water vapor mixing ratio



Des variations locales d'AT humide d'environ 10 cm en l'espace de deux heures ont été mesurées avec des radiomètres micro-ondes, lors de passages de fronts. Les variations plus courantes, dans des conditions relativement stables et sèches, sont toutefois de 2 à 3 cm. Pour une évaluation plus précise, nous avons utilisé les données du lidar Raman CART du DOE (mise à notre disposition par D. Turner).

La figure ci-dessus illustre bien l'évolution rapide et l'inhomogénéité verticale de la vapeur d'eau. Dans ces conditions, une mesure intégrée ne peut fournir une estimation correcte de l'AT, la concentration en vapeur d'eau étant pondérée par la température, donc l'altitude. Pour la quantification de l'inhomogénéité spatiale de la vapeur d'eau, on peut faire l'hypothèse d'une translation de la masse d'air. L'axe des temps représente alors aussi un axe radial dans la direction du vent moyen.

Un problème majeur dans les modèles actuels vient de l'hypothèse d'une symétrie sphérique centrée sur la Terre qui est clairement mise en défaut si l'on considère la structure verticale et horizontale. Ceci a déjà été montré à l'aide de mesures radiométriques directionnelles. Nous prévoyons de compléter ces résultats en utilisant ces données lidar, ainsi que celles de la campagne MAP.

Références

- [DODSON et al 96] A. H. Dodson, P.J. Shardlow, L.C.M. Hubbard, G. Elgered and P.O.J. Jarlemark : *Wet tropospheric effects on precise relative GPS height determination*, in J. Geodesy, vol. 70, n° 4, pp. 188-202, janvier 1996
- [DOERFLINGER 97] E. Doerflinger : *Utilisation de la méthode de positionnement satellitaire GPS pour la détermination précise des altitudes relatives et absolues*, thèse de l'Université de Montpellier-2, 13 Juin 1997.
- [ELGERED 93] G. Elgered : *Tropospheric radio path delay from ground-based microwave radiometry*, in *Atmospheric remote sensing by microwave radiometry*, chap. 5, M.A. Janssen (ed), Wiley, New-York, 1993.
- [ELOSEGUI et al 95] P. Elosegui, J.-L. Davis, R.T.K. Jaldehag, J.-M. Johansson, A.E. Neil and I.I. Shapiro : *Geodesy using Global Positioning System : the effects of signal scattering on estimates of site position*, in J. Geophys. Res., vol. 100, n° B7, pp. 9921-9934, 1995.
- [ENGLAND et al 97] M. England, R. Ferrare, S.H. Melfi, D. Whiteman & T. Clark : *Atmospheric water vapor measurements: Comparison of microwave radiometry and lidar*, in J. Geophys. Res., 97, D1, pp. 899-916, January 20, 1997.

- [ESCALBERT 99] B. Escalbert : *Étude comparative des méthodes de correction de l'allongement troposphérique des mesures GPS*, rapport de stage de DEA en Méthodes physiques en télédétection, IGN, ENSG, juin 1999.
- [FERRARE 95] R. Ferrare, S.H. Melfi, D. Whiteman, K. Evans, F. Schmidlin & D. Starr : *A comparison of water vapor measurements made by Raman lidar and radiosondes*, in J. Atmos. Oceanic Technol., vol. 12, n° 6, pp. 1177–1195, December 1995.
- [GLAUS et al 95] R. Glaus, B. Bürki & H.G. Kahle : *Recent results of water vapor radiometry in assessing vertical lithospheric movements by using space geodetic radiowave techniques*, in J. Geodynamics, vol. 20, pp. 31-39, 1995.
- [GOLDSMITH et al 98] J.E.M. Goldsmith, F. Blair, E. Bisson & D.D. Turner : *Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aerosols*, in Appl. Opt., vol. 37, n° 21, pp. 4979–4990, 20 July, 1998.
- [INABA 76] H. Inaba : *Detection of atoms and molecules by Raman scattering and resonance fluorescence*, in *Laser monitoring of the atmosphere*, chap. 5, E.D. Hinkley (ed), Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1976
- [LIEBE 85] H.J. Liebe : *An update model for millimeter wave propagation in moist air*, in Radio Sci., vol. 20, 1069-1089, 1985.
- [MELFI et al 89] S.H. Melfi, D. Whiteman & R. Ferrare : *Observation of atmospheric fronts using Raman lidar moisture measurements*, in J. Appl. Meteor., vol. 28, pp. 789-806, 1989.
- [PRASAD, MATHUR 98] C.R. Prasad and S. Mathur : *A compact water vapor Raman lidar*, in Proc. of the 19th International Laser Radar Conference, July 6-10, 1998, Annapolis, Maryland, USA, pp. 371-374, 1998.
- [REAGAN 92] J.A. Reagan, K.J. Thome, and B.M. Herman : *A simple instrument and technique for measuring columnar water vapor via near-IR differential solar transmission measurements*, in IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 30, n° 4, pp. 825–831, July 1992.
- [ROCKEN et al 91] C. Rocken, J.M. Johnson, R.E. Neilan, M. Cerezo, J.R. Jordan, M.J. Falls, L.D. Nelson, R.H. Ware and M. Hayes : *The measurement of atmospheric water vapor : radiometer comparison and spatial variations*, in IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 29, n° 1, pp. 3–8, janvier 1991.
- [SANTERRE 91] R. Santerre : *Impact of GPS satellite sky distribution*, in Manuscr. Geod., vol. 16, pp. 28-53, 1991.
- [SCHLUESSEL 89] P. Schluessel : *Satellite-derived low-level atmospheric water vapor content from synergy of AVHRR with HIRS*, in Int. J. Remote Sensing, vol. 10, n° 4-5, 705–721, 1989.
- [SIERK 97] B. Sierk, B. Bürki, H. Becker, S. Florek, R. Neubert, L. Kruse & H. Kahle : *Tropospheric water vapor derived from solar spectrometer, radiometer, and GPS measurements*, in J. Geophys. Res., 102, B10, 22,411–22,424, 10 October, 1997.
- [WARE et al 93] R. Ware, C. Rocken, F. Soleim, T. Van Hove, C. Alber & J. Johnson : *Pointed water vapor radiometer corrections for accurate Global Positioning System surveying*, in Geophys. Res. Lett., 20, 2635-2638, 1993.
- [WHITEMAN et al 92] D. Whiteman, S.H. Melfi & R. Ferrare : *Raman lidar system for measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere*, in Appl. Opt., vol. 31, pp. 3068-3082, 1992.

C.4.7 Mesure de la déformation actuelle dans les Alpes et l'Europe occidentale. Utilisation géodésique d'un réseau de stations GPS permanentes

Jean-Mathieu Nocquet

Contexte - objectifs

Le développement de réseaux de stations GPS permanentes permet la mesure fine des mouvements de la croûte terrestre, de l'échelle globale à locale, sur des périodes de temps, allant de quelques heures aux déformations séculaires. En France, l'IGN et la communauté géophysicienne (universités, CNRS, IPSN, LDG) ont mis en place, depuis 1997, un ensemble de stations opérationnelles sur le territoire français (réseau RGP) et les régions alpines (réseau REGAL).

Les objectifs généraux de ce travail sont :

- la mesure de la déformation intra-continentale dans les régions alpines et péri-alpines,
- la compréhension du lien de la déformation avec la sismicité.

Les intérêts pour les activités de l'IGN sont :

- la connaissance et modélisation des déformations des réseaux dont l'IGN a la charge,
- leur valorisation scientifique,
- le développement d'une expertise scientifique sur les nouveaux équipements géodésiques que constituent les réseaux GPS permanents. Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse encadrée par Eric Calais (CNRS) et d'une convention passée entre l'IGN et l'Unité Mixte de Recherche Géosciences Azur à Sophia-Antipolis. Les

neuf premiers mois de thèse ont été effectués à Sophia-Antipolis. Parallèlement, ce travail s'inscrit dans la mise en place d'une équipe " Mesure des déformations par GPS " au sein du laboratoire LAREG.

Activités

Une première étape a été constituée de la recherche de conditions cinématiques aux limites du système alpin. Pour cela, le champ de vitesse ITRF97 produit à l'IGN a été utilisé.

Cette analyse a montré que :

- un sous-ensemble de sites situés en Europe Centrale définit un référentiel Europe stable avec une rigidité supérieure à 1 mm/yr,
- l'Europe occidentale, à l'ouest du fossé rhénan et des Alpes, n'est pas solidaire de l'Europe Centrale mais se déplace vers l'ouest dans ce référentiel à une vitesse de l'ordre de 2-3 mm/an (ce point nous amène à étendre nos investigations dans l'avant pays alpin, notamment en France, dans le but d'obtenir une image de la déformation active à l'échelle de toute l'Europe de l'ouest. Pour cela, les données du Réseau de Référence Français (RRF) ont été retraitées. Une campagne de mesure GPS réalisée en novembre dans le cadre du programme Géofrance 3D (Volet Fossé Rhénan) a permis de densifier et d'étendre le RRF en Alsace et les régions limitrophes, susceptibles d'absorber de la déformation au niveau de quelques millimètres par an. Les traitements ont été réalisés avec le logiciel GAMIT/GLOBK maintenant opérationnel à l'IGN. Sur les Alpes occidentales, une combinaison d'une solution préliminaire du réseau REGAL sur les Alpes occidentales avec l'ITRF97 a été réalisée),
- les sites situés en Italie présentent des vitesses vers le nord de même direction que la convergence Afrique-Europe. Ces résultats nouveaux expliquent de nombreuses observations géologiques et géophysiques, en particulier le régime de déformation dans le fossé rhénan et les Alpes occidentales.

Suite

L'objectif à court terme est d'obtenir un champ de vitesse précis et cohérent à l'échelle de l'ouest de l'Europe et de la partie occidentale du bassin méditerranéen. Ce champ doit, par ailleurs, être densifié dans des régions particulières comme les Alpes occidentales, les pourtours du fossé rhénan, la Corse et la Sardaigne. Pour cela, des comparaisons/combinaisons doivent être réalisées avec, d'une part, les résultats des campagnes Alpes93-98 et *What a Cat* 94-96, d'autre part, avec les réseaux permanents REGAL, RGP et EUREF.

Dans un deuxième temps, les déformations mesurées par géodésie doivent être confrontées avec les données sismologiques et tectoniques, afin d'en permettre l'interprétation, puis la modélisation. En particulier, une combinaison des résultats de géodésie et des données sismotectoniques devrait permettre une modélisation cohérente de la déformation incluant toutes les données disponibles. Enfin, la dynamique de la déformation sera étudiée par l'utilisation de modèles numériques.

Publication

[NOCQUET, CALAIS, ALTAMIMI, SILLARD, BOUCHER 99] J.-M. Nocquet, E. Calais, Z. Altamimi, P. Sillard, & C. Boucher : *Internal deformation of the Eurasian plate in western Europe deduced from an analysis of the ITRF97 velocity field*, Eos Trans., AGU, Fall Meet. Suppl., F273, IGN/LAREG1999

C.4.8 Positionnement DORIS

Pascal Willis

Contexte - objectifs

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

Il faut noter que 1999 est une année importante pour DORIS car l'Association Internationale de Géodésie a accepté la proposition française de créer une Expérience Pilote DORIS, qui devrait être la première pierre avant la réalisation d'un Service International DORIS (analogue de *l'International GPS Service* pour le GPS).

Cette expérience Pilote est organisée par un groupe de pilotage dont le responsable est G. Tavernier (CNES) et auquel participe Pascal Willis. Une meilleure internationalisation des activités scientifiques liées à DORIS est clairement visée.

Activités

En 1999, un effort important d'organisation et d'information sur le système DORIS a été nécessaire afin de préparer l'Expérience Pilote DORIS (appel international à participation, dépouillement des propositions, préparation d'une réunion scientifique en mai 2000 = DORIS Day 2000,...). Cette action a porté ses fruits puisque de nombreux groupes étrangers ont répondu favorablement à l'appel à participation.

Du point de vue des recherches, un effort informatique important a été indispensable pour pouvoir automatiser le plus possible les activités de calculs de localisation. En particulier, les résultats recherchés sont les déterminations régulières de positions (hebdomadaires, mensuelles) afin de détecter d'éventuelles discontinuités avant d'en rechercher des causes d'origine géophysique. De plus, des séries régulières de ce type (en format SINEX) ont été soumises à l'IERS dans le cadre de l'expérience "série temporelles" organisée par Patrick Sillard. En particulier, des séries hebdomadaires du géocentre ont été obtenues montrant l'intérêt des mesures DORIS sur satellites bas (par opposition aux mesures GPS sur satellites d'altitude moyenne moins performantes dans ce cas particulier). Une partie de ces résultats est encore à l'étude début 2000, en particulier les déterminations des paramètres de la rotation terrestre.

Enfin, le CNES ayant commencé en 1999 à diffuser les données de certaines campagnes DORIS de localisation par le biais de sa filiale CLS, une étude a été menée pour les données de la campagne RPPF (Polynésie française) dans le cadre d'un stage de DEA (R. Zerhouni). Les résultats obtenus sont très encourageants et montrent des répétitivités géodésiques bien meilleures avec le logiciel Gipsy/Oasis que les résultats opérationnels précédents obtenus par CLS (d'un facteur 2 à 5). En particulier, la méthode utilisée (utilisation directe des mesures et non combinaison des matrices normales par satellites) montre que les paramètres communs comme la troposphère possèdent une information intéressante dont il faut tenir compte. Cette remarque serait encore plus vraie si le nombre de satellites DORIS était plus élevé.

Suite

À partir de 2000, les prochains satellites (JASON, puis ENVISAT et SPOT5) posséderont des récepteurs embarqués plus performants car ayant un meilleur signal sur bruit et possédant deux canaux de mesures permettant enfin de ne plus avoir recours au séquençage des mesures DORIS. Il convient tout d'abord de faire évoluer le logiciel Gipsy/Oasis pour pouvoir bénéficier à terme de ces améliorations. De plus, à partir des séries temporelles commencées fin 1999, il est prévu un calcul global de type positions/vitesses pour toutes les stations du réseau DORIS (et des éventuelles campagnes de localisation qui pourraient être diffusées par CLS d'ici-là).

Il faut noter enfin, qu'à la suite de la mission CHAMP (prévue pour avril 2000), de nouveaux modèles de champ d'attraction terrestre seront disponibles (à partir de fin 2000). Le budget d'erreur des mesures DORIS en sera probablement profondément modifié.

Il sera alors indispensable de reprendre toutes les recherches précédentes afin de déterminer à nouveau les meilleures stratégies d'estimation de ces paramètres tant pour les résultats liés à la géodésie ou à la géodynamique (coordonnées des stations et vitesses) que pour la géophysique (paramètres de la rotation terrestre, corrections troposphériques,...). Une augmentation de l'équipe DORIS/IGN (limitée depuis plusieurs années à P. Willis) sera indispensable pour rester compétitif dans le cadre du futur Service International DORIS (une thèse avec financement IGN sera demandée).

Références

[COSTES, WILLIS, CRETAUX 99] M. Costes, P. Willis & J.-F. Crétaux, *DORIS : A contribution to IERS (International Earth Rotation Service)*, 50th Int. Astron. Congress, Amsterdam (NL), 4 au 8 octobre 1999.

[NOLL, RIES, SOUDARIN, TAVERNIER 99] C. Noll, J. Ries, L. Soudarin & P. Willis : *The DORIS Pilot Experiment*, poster présenté à l'American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, décembre 1999.

[WILLIS 99] P. Willis : *DORIS Coordinating Center Report*, 1998 IERS Annual Report, Observatoire de Paris, juillet 1999, pp. 104-112, 1999.

[WILLIS, SILLARD 99] P. Willis & P. Sillard : *Monitoring geocenter and scale variations using DORIS data, Monthly and weekly comparisons toward ITRF references*, IERS Techn. Note 25, pp. 105-115, Observatoire de Paris, avril 1999.

[ZERHOUNI 99] R. Zerhouni : *Traitement et analyse des données de la campagne DORIS en Polynésie française*, rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS13, juillet 1999.

C.4.9 GNSS et GLONASS

Pascal Willis

Contexte - objectifs

Le système américain GPS de radionavigation par satellites a de nombreuses applications en géodésie. Deux autres systèmes de ce type sont amenés à jouer un rôle important à leur tour dans l'avenir, probablement en complément du système GPS déjà existant. Il s'agit du système russe GLONASS qui dispose depuis quelques années d'une dizaine de satellites lancés et du système européen Galileo qui lui n'est encore que dans une phase de faisabilité.

Malgré les nombreuses incertitudes politiques liées au financement à long terme du système russe GLONASS, l'Association Internationale de Géodésie (AIG) a décidé d'organiser à partir d'Octobre 1998 une importante campagne d'observations GLONASS (et Laser) dont la responsabilité a été déléguée à un petit groupe de personnes et dont le responsable principal est Pascal Willis.

Sur le modèle de *l'International GPS Service* (IGS), cette campagne comporte la réalisation d'observations GLONASS et Laser, l'archivage dans des centres de données globaux (dont l'IGN) et l'analyse des données (calculs d'orbites précises, paramètres de la rotation terrestre, correction ionosphérique, troposphérique,...). Cette campagne IGEX-98 est organisée en collaboration avec *l'Institute of Navigation* (ION) et *l'International Earth Rotation Service* (IERS).

Activités

L'activité en 1999 concernant le système GLONASS peut être découpée de la manière suivante :

- organisation de la campagne IGEX-98 et d'un symposium spécialisé (environ deux cents personnes à Nashville (USA), en septembre 1999). La campagne IGEX-98 a été un réel succès car elle a mobilisé environ soixante-dix récepteurs GLONASS (récepteurs mixtes GLONASS/GPS ou récepteurs GLONASS en colocation avec des récepteurs GPS géodésiques). Plusieurs des sites choisis sont des sites importants pour la géodésie en général et pour l'IERS en particulier (colocations avec le système DORIS, VLBI, SLR...). Les résultats présentés à l'automne 1999 montrent que les huit groupes d'analyse ont tous obtenu des orbites précises (certaines de l'ordre de dix à vingt centimètres pour la composante radiale), montrant ainsi les potentialités du système GLONASS, soit seul, soit en complément du système GPS. Cette qualité d'orbite permet d'obtenir dès à présent (sans attendre la constellation complète des satellites GLONASS) des répétitivités géodésiques sub-centimétriques obtenues avec une journée de mesures (logiciel Bernese, développé en Suisse à l'AIUB). Cette activité a fait l'objet en 1999 de plusieurs publications et en particulier de deux publications avec comité de lecture,
- achat et installation de récepteurs GLONASS. En 1999, l'IGN a acheté deux récepteurs mixtes GLONASS/GPS (Ashtech Z-18 avec antenne Dorne-Margolin). Ces récepteurs ont été installés en colocation avec des sites DORIS de l'hémisphère Sud (Libreville, pour lequel une liaison télécommunications n'était pas disponible et à La Réunion). La station de La Réunion a été installée en décembre 1998 par Philippe Nicolon et fonctionne depuis cette date. La station de Libreville a été installée par P. Vergès en mars 1999 et ne fonctionne réellement que depuis quelques mois. Les données collectées ont été très utiles aux centres d'analyse (malgré quelques problèmes opérationnels au début), car les stations comblent des trous très importants dans l'hémisphère Sud,
- gestion du centre de données IGN (Loïc Daniel). Les données ont été récupérées et archivées suivant les mêmes procédures que celles en vigueur depuis quelques années par l'IGS,
- analyse des données. En 1999, le logiciel Gipsy/Oasis a été amélioré pour inclure les mesures GLONASS (codes et phases sur les deux fréquences). Cela a été initialisé durant un séjour de quinze jours de P. Willis au Jet Propulsion Laboratory/USA, en janvier 1999, puis terminé par les équipes du JPL au cours des semaines suivantes. De plus, un stagiaire (A. Sammuneh) a commencé un travail de recherche sur les utilisations scientifiques des mesures GLONASS. Ce travail débouchera en 1999 sur une thèse (financée par les Affaires étrangères).

Le système européen Galileo n'est encore en phase de faisabilité. Des décisions importantes sont attendues pour fin 2000. D'ici-là, l'IGN participe (P. Willis) dans le cadre de groupes de travail (utilisateurs scientifiques) pour donner un avis sur les propositions de réalisation du système qui seront faites à la Commission Européenne fin 2000.

Suite

La campagne IGEX-98 s'est naturellement prolongée sur un groupe de travail de l'IGS (nouveau président J. Slater de la NIMA/USA et dans lequel P. Willis continue à participer) qui a un mandat de quatre ans pour inclure la totalité des activités GLONASS aux activités opérationnelles de l'IGS.

L'effort de recherche porte pour les années à venir sur le choix des stratégies de calcul pour les mesures GLONASS et ses éventuelles applications conjointes avec le système GPS pour les applications topographiques à courte distance (thèse de A. Sammuneh).

Concernant Galileo, l'effort devra être porté en 2000 sur la validation des propositions de faisabilité avant d'être en mesure dans quelques années de faire des propositions d'expérience pilote, voire d'essayer de lancer comme pour GPS et GLONASS une infrastructure scientifique civile pour le calcul *a posteriori* d'orbites précises Galileo pour des applications géodésiques et géophysiques.

Référence

[SAMMUNEH 99] M. Sammuneh : *Intérêts scientifiques de la campagne GLONASS IGEX-98*, rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS14, Juillet 1999.

Publications

[BEUTLER, WILLIS 99] G. Beutler & P. Willis : *The future of IGEX-98, position paper*, in Proc. IGEX-98 Workshop, Nashville, USA, 13-14 septembre 1999.

[EXERTIER, BARRIER, BONNEFOND, WILLIS 99] P. Exertier, F. Barlier, P. Bonnefond & P. Willis : *Techniques spatiales de la géodésie : DORIS, GLONASS et télémétrie Laser*, rapport quadriennal 1995-1998, Comité Français de Géodésie et de Géophysique, Publ., de l'Académie des Sciences, pp. 39-46, 1999.

[SLATER, WILLIS, GURTNER, LEWANDOWSKI, NOLL, WEBER, BEUTLER, HEIN, NEILAN 99] J.A. Slater, P. Willis, W. Gurtner, W. Lewandowski, C. Noll, R. Weber, G. Beutler, G. Hein & R.E. Neilan : *The International GLONASS Experiment (IGEX-98) : Organization, Preliminary results and future plans*, in Proc. Institute of Navigation, ION-GPS99, Nashville, USA, septembre 1999.

[WILLIS 99] P. Willis : *Présentation générale du GPS, perspectives pour le futur*, in Actes des conférences MARI Europe 99, Carrousel du Louvre, pp. 2-4, 27-29, IGN/LAREG, avril 1999.

[WILLIS 99a] P. Willis : *Positionnement par satellites GPS, des applications grand public aux applications scientifiques*, Conférence invitée, Espace et Société, L'Univers d'Ariane, Lycée E. Combes, Pons (F), IGN/LAREG, 19 octobre 1999.

[WILLIS 99a] P. Willis : *IGEX-98, La campagne internationale GLONASS*, in Revue XYZ, 81, 4, pp. 27-29, 1999, republié dans la Revue navigation, 48, 189, pp. 47-52, IGN/LAREG, janvier 2000.

[WILLIS 99b] P. Willis : *IGEX-98 : International GLONASS Experiment*, in *GPS Solutions*, J. Wiley, 3, 2, pp. 66-68, IGN/LAREG, 1999.

[WILLIS, BEUTLER, GURTNER, HEIN, NEILAN, NOLL, SLATER 99] P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R.E. Neilan & J.A. Slater, *IGEX : International GLONASS Experiment, Scientific Objectives and Preparation*, in *Advances in Space research, Pergamon, in Satellite Dynamics, Orbit and Analysis and Combination of space techniques*, J. Dow (Editor), 23, 4, pp. 659-664, 1999.

[WILLIS, SLATER, GURTNER, NOLL, BEUTLER, WEBER, NEILAN, HEIN 99] P. Willis, J.A. Slater, W. Gurtner, C. Noll, G. Beutler, R. Weber, R.E. Neilan & G. Hein : *The GLONASS IGEX-98 Campaign, from its genesis to its realization*, in Proc. IGEX-98 Workshop, Nashville (USA), 13-14 septembre 1999.

[WILLIS, SLATER, BEUTLER, GURTNER, NOLL, WEBER, NEILAN, HEIN 99] : *Highlights and perspectives*, in Proc. IUGG General Assembly, Birmingham (UK), July 1999, accepté pour publication dans IAG Proceedings, Springer-Verlag 1999.

C.4.10 JASON

Pascal Willis

Contexte - objectifs

JASON est une mission satellitaire à buts océanographiques (début prévu à l'automne 2000). Cette mission fait suite à la mission scientifique franco-américaine Topex/Poseidon. Pascal Willis a été accepté comme PI (*Principal Investigator*) pour une étude liée à la précision et l'exactitude des systèmes de référence qui seront utilisés dans les calculs d'orbite opérationnels.

Dans ce cadre. Laurent Morel a obtenu une bourse de thèse IGN sur ce sujet. Cette thèse sera soutenue en fin d'année 2000. Ces recherches sont menées en étroite collaboration avec le CNES/SOD (J.P. Berthias) qui réalise les orbites opérationnelles de Topex et qui fera de même pour Jason à partir de fin 2000 ainsi qu'avec le Jet Propulsion Laboratory/USA (Y. Bar-Sever), qui a réalisé le logiciel Gipsy/Oasis qui est utilisé à l'IGN pour les recherches en géodésie spatiale.

Activités

Dans ce contexte, les études menées à l'IGN en 1999 ont porté sur des simulations réalisées par L. Morel visant dans un premier temps à évaluer l'effet d'une erreur de système de référence (position exacte de l'origine du repère = géocentre, réalisation métrologique du mètre = facteur d'échelle) sur la position estimée du satellite.

L'étude porte sur les systématismes constatés sur l'orbite (radial, tangentiel, le long de la trace) mais aussi sur les dérives dans le temps de ces paramètres. Dans un deuxième temps, ces études ont été appliquées pour essayer d'en déduire les erreurs systématiques qui seraient faites par les océanographes sur l'estimation du niveau moyen des mers et sur sa possible dérive séculaire (pour tenir compte de la dissymétrie Nord-Sud lié à la répartition réelle des océans). Ces études réalisées entièrement à l'aide du logiciel américain Gipsy/Oasis (sur des mesures DORIS) montrent, sous certaines conditions de calculs, que l'effet principal sur l'orbite et sur le niveau des mers provient des erreurs liées à l'indétermination sur le facteur d'échelle (cette conclusion s'oppose à l'avis général, non documenté, qui interprétait l'erreur constatée sur le niveau des mers comme un changement dans la position en Z de l'origine du repère). De plus, les erreurs liées au facteur d'échelle ne sont pas non plus suffisantes pour expliquer les dérives constatées entre les deux groupes d'orbitographie opérationnelle NASA et CNES. Une publication a comité de lecture a été soumise fin 1999 pour présenter ces résultats.

Suite

Il convient maintenant de prolonger ces simulations pour essayer d'en déduire d'éventuelles formules (semi-empiriques) de corrections qui pourraient alors ainsi utiliser les mesures océanographiques de plusieurs missions satellitaires (voire d'une même mission mais sur une durée très longue) pour lesquelles les conventions géodésiques ont évolué au cours du temps, en fonction des améliorations des techniques spatiales qui nécessitent des changements réguliers et discontinus de conventions géodésiques.

Dans cette hypothèse, il ne serait plus nécessaire pour les océanographes, d'avoir à estimer des paramètres empiriques (ce qui est fait en général) ni d'avoir à recalculer les orbites précises de ces satellites (ce qui pourrait être fait, mais qui aurait un coût très élevé).

Une autre voie consiste à regarder plus précisément les erreurs provenant de l'adoption des coordonnées des stations de poursuite dans les calculs orbitographiques (station par station). Une deuxième publication à comité de lecture est prévue sur ce sujet en 2000 dans le cadre de la thèse de L. Morel.

Références

[MOREL, WILLIS 99] L. Morel & P. Willis : *Systematics effects of Terrestrial Reference Frames on Mean Sea level. Determination*, poster au SWT JASON 1999 à Saint-Raphaël (F), groupe POD/Geoid, IGN/LAREG, 1999.

[MOREL, WILLIS 99a] L. Morel & P. Willis : *Systematic errors stations coordinates and Earth Orientation Parameters coming from on TOPEX precise orbit determinations*, poster au SWT JASON 1999 à Saint-Raphaël (F), groupe POD/Geoid., IGN/LAREG, 1999.

[MOREL, WILLIS 99b] L. Morel & P. Willis : *Terrestrial Reference Frame effect on Global sea level rise determined by TOPEX/POSEIDON*, article soumis au Journal of Geodesy, IGN/LAREG, décembre 1999.

C.4.11 Niveau moyen des mers : suivi par les techniques modernes de géodésie et de marégraphie

Guy Wöppelmann

Contexte - objectifs

La surveillance géodésique des marégraphes apparaît comme indispensable aujourd'hui, si l'on souhaite estimer l'évolution à long terme du niveau des mers à partir des longues séries temporelles de marégraphie. L'objet est de corriger les tendances du niveau de la mer indiquées par les marégraphes des déplacements verticaux qui affectent son support.

Les mouvements auxquels on peut s'attendre sont ténus. Le consensus scientifique s'accorde sur une élévation du niveau des mers de l'ordre de 1 à 2 mm/an, alors que les mouvements verticaux de l'écorce terrestre, dits mouvements épirogéniques, sont typiquement de l'ordre de 0 à 10 mm/an, en valeur absolue (phénomènes de déformation lente) et dépendent fortement du lieu. Les nouvelles prévisions de l'IPCC (Panel intergouvernemental sur le changement climatique) ne diffèrent pas significativement des précédentes (1995) et les enjeux demeurent au regard du changement climatique.

Deux approches sont *a priori* possibles pour mesurer les déformations de l'écorce terrestre : l'observation temporaire, répétée à intervalles réguliers, et l'observation en continu. En théorie, il suffit d'occuper les mêmes sites à quelques années d'intervalle, et de mesurer les déplacements des points en réseau. En pratique, les mesures GPS sont affectées par les conditions de propagation des ondes radioélectriques, par la qualité des orbites des satellites GPS, par les caractéristiques des antennes utilisées, ou encore par la stabilité des bornes géodésiques.

Les résultats discontinus dans le temps, annuels typiquement, ne permettent pas de distinguer les erreurs dues aux variations atmosphériques saisonnières, ou les erreurs dues aux différentes antennes utilisées, du vrai signal

épirogénique. Les mesures en continu ont l'avantage de réduire le temps nécessaire à obtenir une incertitude suffisamment petite pour détecter un signal de déplacement significatif.

Elles permettent aussi de limiter les erreurs d'opérateur (centrage des antennes, mesure de hauteur d'antenne, stabilité du trépied, etc.), car les antennes sont montées de manière permanente sur des monuments géodésiques stables.

L'avènement des réseaux GPS permanents permet une troisième approche : réaliser des observations temporaires et répétées en mode géodésique point isolé avec un ou deux récepteurs GPS mobiles. Ces observations sont traitées en bloc avec celles du réseau permanent. La qualité de la surveillance dépend de la configuration et de la densité du réseau d'appui permanent. Il n'est alors pas nécessaire d'organiser des campagnes lourdes et coûteuses, le récepteur tourne de point en point. C'est l'idée du projet GITAM (GPS ITinérant Appliqué aux Marégraphes).

Des calculs GPS permanents sont aujourd'hui conduits en routine dans le réseau national RGP, européen EUREF et mondial IGS (Service International GPS). Toutefois, les procédures de collecte et de calcul qui y sont appliquées reposent sur celles de l'IGS, largement orientées par les applications phares de production d'orbites précises des satellites GPS et de maintenance de réseau de référence. S'il convient de s'inspirer des mécanismes de l'IGS, il est toutefois nécessaire de les adapter aux besoins spécifiques de l'application de surveillance des marégraphes.

Stations pilotes

Brest

Rattachements géodésiques : une équipe du Service de Géodésie et de Nivellement (SGN) de l'IGN est venue à Brest, fin mars, pour :

- effectuer le rattachement en nivellement géométrique du marégraphe au GPS permanent et faire une stabilité des repères de marée avec les repères proches du NGF,
- réaliser la sauvegarde topographique du GPS permanent et son rattachement au système géodésique RGF93,
- rattacher le marégraphe du Conquet par mesures GPS différentielles, puis faire une stabilité des repères de marée par nivellement géométrique en incluant les repères NGF proches.

Les résultats sont disponibles dans le rapport [BOULANGER 99]. Une partie des opérations (a et c) sera répétée par le SHOM, *a priori* tous les neuf mois, sur les prochains trois-quatre prochaines années. L'objet est de s'assurer de l'hypothèse de stabilité locale des sites.

Équipement complémentaire : En avril 1999, une station météorologique Vaisala PTU 200 est venue compléter le récepteur GPS permanent dans le cadre d'une expérience avec Météo-France. Après quelques difficultés de matériel, puis de logiciel, la station enregistre, depuis juin 1999, des mesures de pression, de température et d'humidité toutes les dix minutes.

Ces données sont collectées par liaison téléphonique avec celles du GPS et sont disponibles sur le serveur du RGP (<http://lareg.ensg.ign.fr/RGP/>).

Revue des données anciennes (avant 1860) : Les niveaux moyens de la mer de Brest, avant 1860, sont des moyennes des pleines et basses mers observées pendant la journée. Or, les moyennes des pleines et basses mers (MTL) sur un intervalle de temps donné ne sont *a priori* pas identiques aux niveaux moyens de la mer (MSL) : influence des harmoniques de courte période de la marée.

À Brest, deux types d'erreur systématique sont, de fait, présents dans les valeurs du niveau moyen de la mer publiées avant 1860 :

- une erreur systématique introduite par l'harmonique M4,
- une erreur systématique introduite par le sous-échantillonnage des observations réalisées pendant le jour (pas d'observations la nuit).

En définitive, les valeurs annuelles du niveau moyen de la mer à Brest avant 1860 sont environ trois centimètres plus basses qu'elles n'ont été publiées à ce jour (PSMSL en particulier). La tendance du niveau de la mer à Brest n'est plus de + 0,96 mm/an, mais de + 1,13 mm/an. La dernière estimation est plus cohérente (meilleure précision).

Ces résultats ont été présentés à l'UGGI, le 22 juillet 1999, dans la session *JSG11 (Sea-level changes and vertical ground movements)*.

Marseille

Filtrage mécanique : Une nouvelle expérience avec les marégraphes à pression a été réalisée en janvier 1999 pour confirmer l'origine du filtrage excessif remarqué en juillet 1998 (soixante centimètres de vase gênaient l'accès de

l'eau au puits en moyenne sur la première partie du chenal). Les résultats sont positifs, toutefois subsistent encore des différences entre les observations du large et celles du puits.

Les conditions météorologiques et la configuration du site, notamment le chenal d'entrée, sont mises en avant pour expliquer ce filtrage mécanique. Une étude approfondie doit être menée pour mieux comprendre le problème. Cette étude nécessiterait l'observation du niveau de la mer hors du puits par un marégraphe-plongeur sur une année, ainsi que la collecte des paramètres météorologiques (vent en particulier).

Étalonnage : une opération d'étalonnage des marégraphes, totalisateur et à ultrasons, a été réalisée le 3 février 1999. L'exploitation des observations a permis de déterminer les calages des deux marégraphes. L'application du test de Van de Casteele montre que la remise en état du marégraphe totalisateur après l'acte de vandalisme du 14 juillet 1997 a amélioré les performances de l'appareil. L'amplitude du cycle d'hystérésis s'est notablement réduite. En revanche, le défaut d'échelle relevé dans l'étalonnage du 10 décembre 1996 semble se confirmer sur cette nouvelle plage de mesure.

Le défaut d'échelle est dû à une mauvaise transmission de l'information. Il correspond à un rapport variable de mesure entre le déplacement du style inscripteur et celui du flotteur. L'effet sur les données moyennes du niveau de la mer est de nature systématique. De nombreux éléments peuvent générer ce défaut : variation du rayon du tambour d'enroulement du câble, chevauchement des spires sur le cylindre, diamètre du fil, etc. Néanmoins, dans le cas présent, l'origine de l'imperfection est attribuée aux remplacements des différents fils de guidage du flotteur, des contrepoids, etc. Ces fils ont en effet été successivement remplacés par des fils de nature différente, non spécifique, parfois même de la corde !

Le marégraphe à ultrasons présentait également un défaut d'échelle important. Dans son cas, l'origine proviendrait des retards dans l'électronique du capteur. Le défaut a été corrigé récemment par l'ajustement des paramètres internes de l'appareil. Cet ajustement n'avait pu se faire plus tôt en raison des développements logiciels en cours pour les capteurs à courtes portées. Les corrections sont cependant applicables rétrospectivement sur l'ensemble des observations enregistrées jusqu'ici, depuis juillet 1998.

Numérisation des marégrammes : le travail de numérisation est toujours en cours au SGN. Outre l'intérêt scientifique, remarquons que ce travail est essentiel pour préserver des données historiques de valeur inestimable qui remontent à la fin du siècle dernier : les rouleaux de papier se dégradant avec le temps.

La rencontre du 20 janvier 1999 [EPSHOM 99b] a permis de comprendre l'origine des anomalies constatées dans les données du marégraphe de Marseille numérisées par l'IGN et envoyées à l'EPSHOM. Elle a aussi permis de juger et valider la chaîne de numérisation mise en place à l'IGN. Notons que les prévisions de numérisation n'ont malheureusement pas pu être tenues (vingt années de marégrammes, soit deux cent quarante rouleaux) : opérateur agressé et arrêt maladie de plusieurs mois.

Ajaccio

L'observatoire d'Ajaccio (site d'Aspretto) se construit progressivement. Son intérêt premier est le contrôle des altimètres radar embarqués sur satellite. Il est piloté scientifiquement par P. Exertier (OCA/CERGA) avec le soutien de plusieurs organismes partenaires, dont l'IGN. Philippe Nicolon (IGN) a réalisé l'installation du récepteur GPS permanent, en janvier 2000. À cette occasion, il a aussi effectué la sauvegarde topographique du GPS, son rattachement au système géodésique RGF93 et divers rattachements entre points importants du site : repères de marée du marégraphe qui sera bientôt être installé par le SHOM, et du gravimètre absolu qui a observé en octobre 1999.

Autres stations

Un état des lieux du rattachement géodésique des marégraphes en France a été dressé et présenté à la réunion du Conseil du GRGS du 13 avril 1999, et une proposition de Recherche Spatiale a été soumise à cet organisme. Il s'agit d'une demande de soutien financier (frais de mission essentiellement) pour l'année 2000. L'objet est de dresser un bilan détaillé de l'état des observatoires marégraphiques sous responsabilité française participant au réseau mondial GLOSS.

Elle se poursuivra *a priori* par :

- l'étude des solutions pratiques et techniques pour pallier les diverses lacunes identifiées,
- leur mise en œuvre pour disposer d'observatoires côtiers du niveau de la mer de grande qualité métrologique.

L'intérêt et le potentiel du système de positionnement français DORIS pour la surveillance géodésique des marégraphes ne font plus de doute. Seize balises DORIS se trouvent à moins de onze kilomètres d'un marégraphe GLOSS ; six se trouvent, entre onze et cinquante kilomètres ; et cinq, entre cinquante et cent vingt kilomètres.

Une politique de rattachement systématique des marégraphes est appliquée par le SGN de l'IGN, en charge des opérations de maintenance ou d'installations nouvelles des balises du réseau d'orbitographie. À ce jour, les marégraphes suivants ont fait l'objet de rattachements à DORIS : Ushuaia (janvier 1995), Papeete (juillet 1995), Ascension (février 1997), Nouméa (février et avril 1998), Reykjavik (août 1998) Ponta Delgada (novembre 1998) et Chatham Island (février 1999).

Étude des spécifications techniques du centre de données SONEL

Les fondements du système SONEL ont fait l'objet d'un document de référence dans lequel sont rappelés les objectifs, la nature et l'organisation de SONEL, ainsi que les données et les produits combinés de la marégraphie et de la géodésie spatiale du futur service [WÖPPELMANN et al 99c]. Un effort de clarté était recherché, le document ayant pour objet de servir à présenter SONEL aux partenaires et utilisateurs potentiels.

Normes et standards internationaux

Du 10 au 14 mai 1999, se sont tenues à Toulouse, les réunions des groupes de travail et d'étude de EOSS, IGS/PSMSL et GLOSS, auxquelles nous avons participé [EPSHOM 99c].

Rappelons quelques éléments importants :

- concernant l'archivage, l'échange et la diffusion des données et des résultats de la synergie des techniques de marégraphie et de géodésie, force est de constater que les groupes de travail internationaux n'ont pas avancé sur ces questions. Les discussions se situent encore au niveau de la stratégie d'observation. L'emplacement des récepteurs permanents est en effet sujet de controverses. Deux opinions s'affrontent : l'observation GPS en continu sur le marégraphe ou en un point éloigné d'au plus dix kilomètres du marégraphe. Il convient de noter dans cette polémique que les stations de Brest et de Marseille, présentées lors des diverses rencontres, font l'unanimité et sont considérées comme des modèles d'observatoires à suivre,
- les questions d'analyse des mesures GPS sont abordées dans les groupes de travail internationaux. Les procédures de collecte et de calcul GPS appliquées dans EUREF ou dans le RGP sont fondées sur celles de l'IGS (Service International GPS), largement orientées vers leur application principale de production d'orbites précises des satellites GPS (flux de données, calculs et solutions en *batches* journaliers qui se superposent en se décalant...). S'il convient de s'inspirer des mécanismes de l'IGS, il est toutefois indispensable de les adapter aux besoins spécifiques de l'application de surveillance des marégraphe,
- aujourd'hui, force est de constater qu'il n'existe pas encore de centre produisant des solutions dédiées des stations GPS permanentes en colocation avec des marégraphe. Et cela malgré un intérêt scientifique largement exprimé par la communauté internationale. Qui plus est, certaines de ces stations soumises à l'IGS ne sont calculées par aucun centre d'analyse associé à ce service (AC, RNAAC ou GNAAC dans la terminologie IGS employée pour désigner les divers types de centres d'analyse associés).

Présentation de SONEL

Les activités entreprises par l'IGN et le SHOM, et en particulier le projet SONEL, ont été présentées au moins à deux reprises :

- la première, à la réunion EOSS du WP1,
- la deuxième, au congrès de l'UGGI, à Birmingham (UK), en juillet 1999 [DANIEL et al 99].

Rappelons que SONEL n'a pas à proprement parlé de réseau d'observatoires. Il correspond plutôt un réseau virtuel fédérant des réseaux d'observation indépendants sous la responsabilité d'organismes partenaires. Ces derniers peuvent trouver dans SONEL une diffusion et une valorisation complémentaires de leurs données, tout autant qu'un soutien scientifique et technique pour contrôler la qualité des observatoires et, le cas échéant, contribuer à leur mise à niveau.

Développement et analyse du système

Un effort est réalisé pour mettre par écrit une documentation qui permette le suivi du développement et de l'analyse du système SONEL. Elle est partiellement disponible *via* Internet, car les études et développements sont en cours.

Groupe national de coordination SONEL

L'idée est de mettre en place un groupe national qui organise et coordonne de manière raisonnée et rationnelle les ressources et les efforts nationaux, pour mesurer le niveau de la mer dans un ensemble d'observatoires côtiers et surveiller l'évolution de ce paramètre dans des référentiels local et mondial. Un appel à participation a été envoyé fin 1999 [EPSHOM 99d]. Nous y avons joint le document de référence sur SONEL.

Calculs GPS

Les observations GPS d'Ajaccio, depuis janvier 2000, de Brest, depuis novembre 1999, et de Marseille, depuis juillet 1998, sont collectées, puis traitées en routine dans le réseau GPS national. Ces stations contribuent au réseau européen EUREF. Leurs données sont traitées par au moins trois centres d'analyse EUREF (Ajaccio ne sera incorporée qu'à partir du 20 février 2000).

Les rapports de combinaison des solutions hebdomadaires produites par EUREF (centre de combinaison CODE, puis BKG depuis la fin août 1999) montrent des résidus de l'ordre de un à deux millimètres sur les composantes horizontales et de quatre à cinq millimètres sur la composante verticale pour Brest et Marseille.

L'analyse des résultats GPS fournis par le laboratoire LAREG montre que la composante verticale est trois à six fois moins bien déterminée que les composantes horizontales.

Ce résultat ne surprend pas, il s'explique par la configuration du système et par les nombreuses sources d'erreur qui affectent *a priori* cette composante : propagation des ondes radioélectriques dans l'atmosphère, caractéristiques et variations du centre de phase des antennes GPS, stabilité des monumentations, réalisations du système de référence, etc. L'amplitude des effets dépend du site et de son environnement.

Les résultats de Brest montrent un signal singulier sur la composante verticale des résultats GPS, sensiblement cyclique. Cela ressemble à un effet de marée. Les résultats préliminaires de l'analyse harmonique confirmeraient cette hypothèse. D'autant qu'il convient de se rappeler que la surcharge océanique n'est pas encore corrigée dans les calculs du RGP. Un effet de marée subsisterait donc dans les solutions journalières et hebdomadaires.

Les solutions horaires du calcul en ligne de base entre Le Mans et Brest, sur lesquelles est appliquée cette analyse harmonique, font toutefois l'objet de quelques critiques. De nombreuses sources d'erreur systématique aux périodes proches de la marée diurne peuvent affecter ces résultats GPS : effets météorologiques, orbite des satellites, réalisation du système de référence, antenne GPS, etc.

Il sera intéressant d'affiner la stratégie de production de solutions GPS horaires (en réseau). Mais la gravimétrie absolue apparaît aussi comme une source d'information indépendante et complémentaire de celle qui est apportée par les techniques de positionnement spatiales en général, et GPS en particulier. Leur comparaison est précieuse pour valider les résultats respectifs et pour étudier les erreurs systématiques propres à chacune, déceler en particulier des artefacts de calcul qui seraient présents dans le processus d'ajustement des observations GPS, etc.

La communauté scientifique française dispose désormais d'un gravimètre absolu. Le SHOM a engagé une expérience en partenariat avec l'EOST de Strasbourg (J. Hinderer), l'ESGT (F. et H. Duquenne), les Universités de La Rochelle (N. Florsch et M. Llubes) et de Nice (E. Calais) et l'IGN (D. Maillard et M. Kasser) pour évaluer les mouvements verticaux qui affectent le site de Brest à courte (surcharge océanique) et à longue période (mouvement à long terme).

GITAM (GPS ITinérant Appliqué aux Marégraphes)

La proposition concerne les marégraphes d'intérêt qui ne sont pas déjà surveillés de manière continue par une technique primaire de géodésie spatiale. L'idée est de déterminer leur position dans le système de référence ITRS de manière précise et périodique à partir d'observations GPS de plusieurs jours. Ces observations seront traitées en mode géodésique point isolé en bloc avec l'ensemble du réseau RGP. La précision du centimètre sur la composante verticale est *a priori* possible en suivant cette stratégie.

Les travaux envisagés en 1999 sont décrits dans la section 4 de la proposition GITAM, version du 18 février 1999. L'action de base n'a pas encore été entreprise, à savoir : définir (concevoir) la monumentation GPS qui permettra de réaliser les mesures GPS périodiques de quelques jours prévues dans le projet. En revanche, la coopération entre le SGN de l'IGN et le SHOM, sur les rattachements géodésiques des repères de marée, porte ses fruits. Elle a permis de rattacher plusieurs marégraphes en 1999.

Nous avons déjà mentionné Brest et Le Conquet. C'était également le cas de Dieppe, La Pallice, les Sables d'Olonne, Dunkerque, Calais et Boulogne-sur-Mer, en nivellement de précision. Il ne s'agit pas d'actions dédiées et programmées. Dès qu'une opportunité est connue de l'IGN (travaux de vocation, réfection des réseaux, etc.), le SHOM est informé et des échanges permettent de définir les marégraphes et repères qu'il est souhaitable de rattacher.

EUVN

Le groupe de travail EUVN a mis l'accent sur la collecte des données marégraphiques dans sa lettre circulaire n° 7 de janvier 1999 [EUVN 99]. Un état des lieux de l'information reçue et disponible a été dressé récemment pour présentation au EUREF TWG Meeting qui s'est tenu à Dresde (Allemagne) du 28 au 29 octobre 1999.

Perspectives

Il convient de remarquer que les calculs GPS du RGP se limitent à la France continentale et à la Corse. Or, nombreux sont les marégraphes d'intérêt qui se trouvent ailleurs, répartis sur le globe. Un calcul global de type

scientifique doit donc être envisagé pour atteindre la meilleure précision possible en cet ensemble de sites de marégraphie répartis dans le monde.

Considérant l'évolution du contexte, nous proposons d'entreprendre une expérience pilote de centre d'analyse associé de l'IGS orienté vers la surveillance géodésique des marégraphes. Cette expérience se réaliserait en partenariat avec le centre d'analyse IGS CODE de l'Université de Berne et s'appuierait sur le logiciel de traitement des mesures GPS Bernese.

Un nouveau schéma de collecte et de traitement des mesures GPS devrait être étudié et mis en place, dédié à l'application de surveillance géodésique des marégraphes. Il accepterait les mesures qui arrivent en retard (un mois après par exemple) et permettrait de retraiter l'ensemble des données depuis l'origine suivant des nouvelles stratégies.

Les groupes de travail EOSS et IGS approuvent l'idée de mettre en place de tels centres d'analyse dédiés, au moins deux pour confronter et valider les résultats respectifs, *via*, par exemple, la section ITFS de l'IERS. Des appels à participation de l'IGS sont prévus courant de l'année 2000.

Entre-temps, nous avons entrepris un sondage auprès des communautés internationales de géodésie et d'océanographie. L'objet était de se faire une idée précise des sites de marégraphie qui disposent effectivement de récepteurs GPS permanents, de leur intérêt et de leur niveau de prise en charge par les services scientifiques internationaux. Le sondage semble avoir suscité un grand intérêt si l'on se fie aux réponses reçues et aux *logs* d'accès du serveur qui héberge les résultats du sondage. Une synthèse détaillée des résultats du sondage est disponible depuis décembre 1999 [WÖPPELMANN et al 99e].

Références

- [BOULANGER 99] P. Boulanger : *Station de Brest, Sauvegarde métrologique*, IGN, CR/G 99, octobre 1999, 29 pages, 1999.
- [EPSHOM 99d] E. Caillau : *Mise en place un groupe de coordination SONEL*, in Lettre n° 374, EPSHOM/CH/GG/NP du 6 juillet 1999.
- [FAGARD 99a] H. Fagard : *Installation de la station DORIS de Ponta Delgada (Açores, Portugal)*, IGN, CR/G 88, 16 pages, mai 1999.
- [FAGARD 99b] H. Fagard : *Rattachement de l'antenne DORIS de Reykjavik (Islande)*, IGN, CR/G 89, 18 pages, mai 1999.
- [FAGARD 99c] H. Fagard : *Installation de la station DORIS de l'île Chatham (Nouvelle Zélande)*, IGN, CR/G 90, 26 pages, octobre 1999.
- [VERGEZ 99] P. Vergez : *Remplacement de l'antenne DORIS sur l'île de Socorro (Mexique)*, IGN, CR/G 92, avril 1999.

Publications

- [DANIEL et al 99] L. Daniel, S. Allain, C. Boucher, B. Simon & G. Wöppelmann : *SONEL - Towards a national integrated coastal sea-level monitoring system*, poster présenté à la 22ème Assemblée générale de l'UGGI, Session U7 (Integrated Global Monitoring Networks), Birmingham (UK), IGN/LAREG, 18-30 juillet 1999.
- [EPSHOM 99b] G. Wöppelmann : *Numérisation des marégrammes de Marseille*, compte-rendu n° 95, EPSHOM/CH/GG/ET/NP de mission à Saint-Mandé, IGN/LAREG, février 1999.
- [EPSHOM 99c] G. Wöppelmann : *Systèmes d'observation du niveau des mers EOSS, GLOSS*, compte-rendu n° 316, EPSHOM/CH/GG/ET/NP des réunions du 10 au 14 mai 1999 à Toulouse, 9 pages, juin 1999.
- [EPSHOM 99a] G. Wöppelmann : *Coopération SHOM-IGN sur les activités de recherche en géodésie*, compte rendu n° 84 EPSHOM/CH/GG/ET/NP de la réunion du 7 janvier 1999 à Brest, 15 pages, février 1999.
- [EUVN 99] J. Adam, B. Harsson, W. Gurtner, J. Ihde, W. Schlüter, G. Wöppelmann and T. Springer : *Lettre circulaire n° 7 produite par le groupe de travail EUVN de la Sous-commission EUREF de l'Association Internationale de Géodésie*, 32 pages, janvier 1999.
- [IHDE et al 99] J. Ihde, J. Adam, W. Gurtner, B. Harsson, W. Schlüter, and G. Wöppelmann : *Status Report of the EUVN*, EUREF TWG Meeting, held in Dresden, october 28-29, 10 pages, 1999.
- [WÖPPELMANN 98] G. Wöppelmann : *Marégraphie et géodésie spatiale : bilan d'un travail de recherche sur leur synergie*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 69, pp. 65-77, 1999/3.
- [WÖPPELMANN et al 99a] G. Wöppelmann, C. Boucher & B. Simon : *Les rattachements et le suivi des marégraphes : la situation vue par l'IGN et le SHOM*, rapport rédigé pour la réunion du Conseil du GRGS du 13 avril 1999, publications du LAREG, Série Rapport, 27 pages, octobre 1999.
- [WÖPPELMANN et al 99b] G. Wöppelmann, S. Allain, P. Bahurel, S. Lannuzel & B. Simon : *Zéro hydrographique vers une détermination globale*, in Revue XYZ, n° 79, 2e trimestre 1999, pp. 27-34, 1999.
- [WÖPPELMANN et al 99c] G. Wöppelmann, S. Allain, C. Boucher, L. Daniel, et B. Simon : *Présentation du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales - SONEL*, 40 pages, mai 1999.
- [WÖPPELMANN et al 99d] G. Wöppelmann, S. Allain, C. Boucher, S. Lannuzel, D. Maillard & B. Simon : *Continuous GPS monitoring at Brest and Marseille GLOSS tide gauges*, poster présenté à la 22^e Assemblée générale de l'UGGI, Session JSG11 (Sea-level changes and vertical ground movements), Birmingham (UK), 18-30 juillet 1999.
- [WÖPPELMANN et al 99e] G. Wöppelmann, C. Boucher, C. Bruyninx and P. Woodworth : *Continuous GPS positioning of tide gauges. Progress report on the survey*, in Rapport annuel du PSMSL pour 1999, accessible par le Web à l'adresse <http://www.pol.ac.uk/psmsl/psmsl.info.html>, 1999.

C.4.12 Réseau GPS Permanent

Didier Maillard et Philippe Nicolon

Contexte - objectifs

La mise en place d'un réseau GPS permanent a démarré à l'IGN en 1997. Cette activité s'est poursuivie en 1998 et 1999. Le but de cette action était de montrer la faisabilité et l'intérêt de ce réseau. Le réseau consiste en un ensemble de stations GPS permanentes couvrant la France métropolitaine. L'acquisition, l'installation et le fonctionnement des stations est le résultat d'une coopération entre plusieurs organismes. Une des spécifications est de rassembler les divers types courants de matériels adaptés (Osborne, Trimble, Ashtech, Leica,...) en essayant d'avoir au moins deux récepteurs de chaque type.

Ce réseau est issu d'un partenariat actif avec un grand nombre d'organismes :

- Centre Littoral de Géophysique, Université de la Rochelle (CLDG),
- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES),
- École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT, Le Mans),
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC),
- Météo France,
- Observatoire de la Côte d'Azur (OCA),
- Ordre des Géomètres Experts (OGE),
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM),
- Université de Nice Sophia Antipolis, CNRS (REGAL).

Les stations sont gérées par leur "propriétaire", les données étant acheminées vers le serveur du RGP pour traitement par le laboratoire LAREG.

Chaque semaine un calcul de l'ensemble des stations est réalisé puis publié sur le serveur Web du RGP.

Activités

Installation des stations

En 1999 trois stations ont été installées : Strasbourg (IPG), Montpellier (Université de Montpellier) et Ajaccio (IGN).

Fin 1999, onze stations étaient disponibles dans le réseau, trois stations manquent encore au projet initial :

- Nantes (station du LCPC) qui est encore en phase de test,
- Chizé (Université de la Rochelle),
- Saint-Jean-de-Luz (IGN) qui devrait être installée début 2000.

Début novembre 1998, le laboratoire LAREG est devenu un des onze centres de calcul du réseau Européen (EUREF). À ce titre, nous calculons chaque semaine, une partie du réseau européen et notre solution est incluse dans la solution hebdomadaire EUREF.

Rattachements géodésiques

En 1999 une série de neuf rattachements géodésiques a été entreprise par le SGN.

Ces rattachements ont été réalisés en plusieurs étapes :

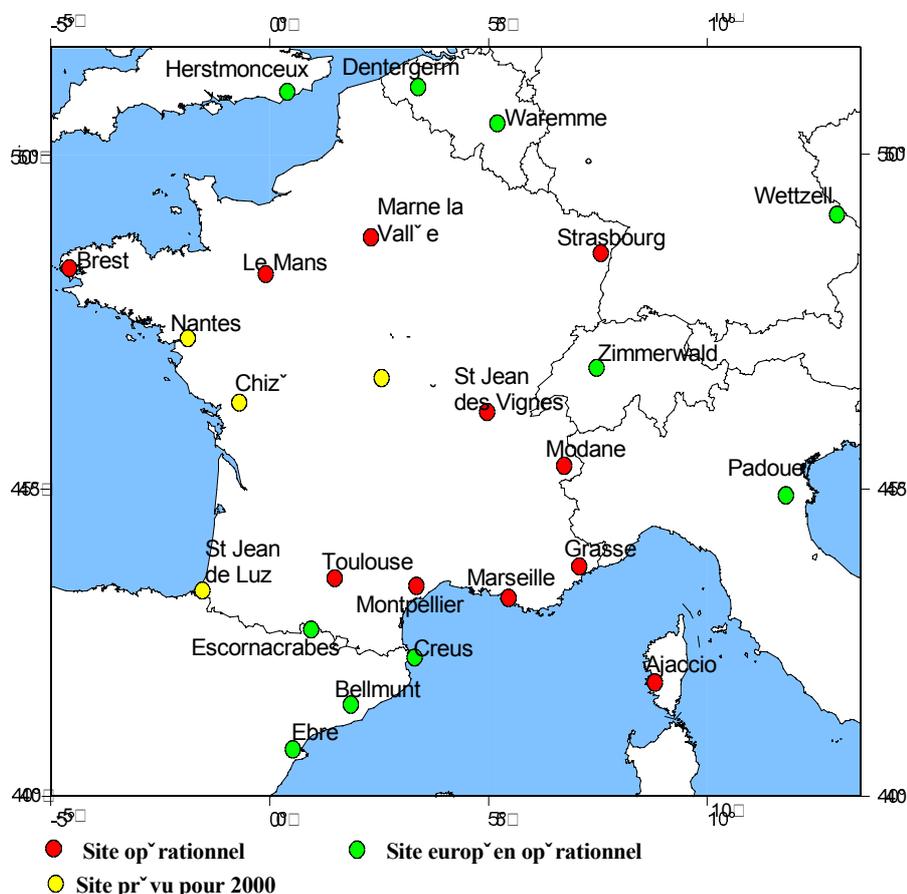
- une sauvegarde topométrique proche : pose de repères de proximité et rattachement de type TS,
- une sauvegarde régionale par observations GPS des sites RRF les plus proches,
- un rattachement au système géodésique RGF93,
- éventuellement un rattachement au NGF.

Équipement complémentaire

Dans le cadre d'une expérience menée par Météo France sur le réseau permanent, trois stations GPS ont été équipées d'une station météorologique Vaisala PTU 200 (Brest, Montpellier et Saint Jean des Vignes). Ces capteurs (température, pression et humidité) sont connectés à la station GPS ce qui permet l'enregistrement des données météo directement dans les fichiers d'observations GPS.

Perspectives

Les évolutions prochaines du RGP seront réalisées par le SGN, elles consisteront en une densification du réseau, calcul et émission des corrections de navigation, mise à disposition de données horaires.



Références

- [BOULANGER 99a] Boulanger : *Station de Marne la Vallée, Sauvegarde météorologique*, IGN/LAREG, CR/G 94, juin 1999.
- [BOULANGER 99b] Boulanger : *Station de St-Jean-des-Vignes, Sauvegarde météorologique*, IGN/LAREG, CR/G 97, septembre 1999.
- [BOULANGER 99c] Boulanger : *Station de Brest, Sauvegarde météorologique*, IGN/LAREG, CR/G 99, octobre 1999.
- [BOULANGER 99d] Boulanger : *Station de Modane, Sauvegarde météorologique*, IGN/LAREG, CR/G 103, septembre 1999.
- [NICOLON 00] P. Nicolon : *Station d'Ajaccio. Sauvegarde météorologique*, IGN/LAREG, 1999.
- [EUVN 99] J. Adam, B. Harsson, W. Gurtner, J. Ihde, W. Schlüter, G. Wöppelmann and T. Springer : *Lettre circulaire n° 7*, produite par le groupe de travail EUVN de la Sous-commission EUREF de l'Association Internationale de Géodésie, IGN/LAREG, janvier 1999.
- [IHDE et al 99b] J. Ihde, J. Adam, W. Gurtner, B. Harsson, W. Schlüter, and G. Wöppelmann : *Status Report of the EUVN Project*, EUREF TWG Meeting, held in Dresden, october 28-29, 1999, 10 pages, IGN/LAREG, 1999.
- [DOERFLINGER 00]. E. Doerflinger et G. Sommeria : *Compte rendu de la réunion de travail GPS et Météorologie*, IGN/LAREG, janvier 2000.

C.4.13 Groupement de Recherche AGRET

Martine Feissel

Note liminaire

Martine Feissel a rejoint le laboratoire LAREG en mai 1999, dans le cadre d'une convention de mise à disposition par son établissement d'origine, l'Observatoire de Paris. Le protocole précise qu'elle exercera au laboratoire LAREG les activités suivantes : direction scientifique du GdR AGRET (Astrométrie, géodynamique et systèmes de référence) du CNRS, préparation de la contribution du laboratoire LAREG à ce GDR, et étude de la contribution du VLBI au repère terrestre. Son activité à l'Observatoire de Paris concerne la participation au centre d'analyse VLBI de cet établissement (responsable : A.-M. Gontier).

L'activité principale du GDR en 1999 a été l'organisation d'un colloque fondateur qui a réuni sur deux jours, Salle de l'Espace du CNES à Paris, quatre-vingt-treize participants d'une trentaine de laboratoires.

Le programme comportait vingt-sept présentations invitées sur les thèmes suivants :

- physique de la mesure,
- analyse des mesures, généalogie du résultat,
- mouvements du géocentre,
- références et mouvements verticaux,
- unification des références,
- mathématiques appliquées et séries temporelles géodynamiques,
- sites géodynamiques AGRET.

Les présentations ont donné lieu à de nombreuses discussions, parfois vives, toujours animées, montrant que les conditions sont réunies pour l'intensification d'un travail interdisciplinaire, sans minimiser la nécessité d'ajustement mutuel entre des communautés de cultures professionnelles parfois fort différentes. En outre, les discussions ont mis en évidence le rôle central que jouent les " observatoires géodynamiques " dans les recherches intéressant le GDR.

Il peut s'agir d'une région où se produisent des phénomènes géophysiques relativement rapides (par exemple : Djibouti, les Andes, les Alpes) ou d'intérêt particulier (par exemple : l'interaction océan-terre solide en Bretagne) qu'il est important de mesurer et de suivre temporellement par les méthodes géodésiques appropriées, ou encore d'un site équipé d'un ensemble de dispositifs de mesure permanente en colocalisation : techniques spatiales, marégraphes, etc, dont il importe d'assurer la pérennité (par exemple : Calern, Aspreto, Tahiti, Brest, Marseille). En effet, les mouvements géophysiques, océaniques ou climatiques dits rapides ont un temps caractéristique au minimum décennal. Ces activités ont un caractère pluri-disciplinaire extrêmement fructueux pour la recherche en Sciences de la Terre.

Les actions suivantes ont été engagées en application des recommandations du colloque :

- élaborer et promouvoir auprès des organismes nationaux un plan stratégique d'actions pluri-disciplinaires concertées (observation, analyse, interprétation) dans des observatoires ou sites géodynamiques sélectionnés,
- organiser des études trans-disciplinaires dans des domaines où les communautés représentées au colloque sont susceptibles de s'épauler mutuellement.

Les sujets retenus sont les suivants :

- protocole AGRET d'installation et de maintenance de sites géodynamiques,
- sensibilité des dispositifs globaux d'observation aux paramètres géodynamiques,
- mouvements du géocentre: synthèse sur les concepts et les mesures,
- analyses expérimentales pour contribuer à l'unification des références,
- approche statistique du traitement des observations.

Le GDR a ouvert un site Web hébergé par le laboratoire LAREG : <http://lareg.ensg.ign.fr/AGRET>.

C.4.14 Astrogéodésie VLBI

Martine Feissel

Les études présentées par M. Feissel s'articulent autour des développements du centre d'analyse VLBI de l'Observatoire de Paris, utilisant le logiciel d'analyse original GLORIA (Global Radio Interferometry Analysis). Un automate informatique a été mis au point pour le traitement de la série d'une à deux sessions de vingt-quatre heures, effectuées chaque semaine dans le cadre de l'IVS.

Ces sessions comportent mille à six mille observations par dix à vingt bases sur plusieurs dizaines de radiosources. L'automate élabore deux produits principaux : les paramètres de la rotation terrestre pour les besoins opérationnels de l'IERS, et la validation des observations établissant un ensemble de données nettoyées disponibles pour les analyses scientifiques ultérieures.

Le calcul est effectué dès que de nouvelles sessions sont déposées aux Centres de Données de l'IVS. L'automate a été mis au point sur les sessions de l'année 1999. L'écart-type final des résidus par session se situe entre trente et quatre-vingt picosecondes. L'accord de la solution des paramètres de la rotation terrestre avec la série C04 de l'IERS est au niveau de un centimètre.

Le tableau C.4.14.1 donne un exemple de validation disponible à l'issue du traitement opérationnel, les statistiques des résidus par station, obtenus par la méthode du tricorné à partir des résidus par base pour vingt et une sessions de 1999.

tableau C.4.14.1 : les dix stations VLBI les plus actives en 1999.
Résidus quadratiques moyens après analyse GLORIA. Unité : picoseconde (1 ps correspond à 0,3 mm).

		Station									
		GILCR	KOKEE	MEDIC	NYALE	WESTE	ALGOP	MARTR	FORTL	METTS	NRAO2
		N. DOMES									
		40408	40424	12711	10317	40440	40104	30302	41602	14201	40441
date	MJD	s002	s007	s001	s003	s003	s001	s001	s001	s004	s007
99 01 13	51192	28	48	40	33	72					
99 01 26	51205	39				30	1	52			
99 03 10	51248		51		36		18		45		
99 03 15	51253	31				40		36	49	27	
99 03 24	51262	36	56	48	32	49					
99 04 06	51275	23		27		33	55	75			48
99 04 19	51288	33				37		36	50	32	
99 05 03	51302	40				37		37	49	37	
99 05 05	51304	48	56	51	35	54					
99 05 18	51317	38		44		41	43	50			44
99 06 01	51331	35				47	27	50			48
99 06 14	51344	36				60		44	45	45	
99 06 29	51359		41		31				38	29	35
99 07 06	51366	35	39						31	49	53
99 07 14	51374	54	68	63	41	56					
99 07 19	51379	47				47		36	49	49	
99 07 27	51387	46		54		58	30	29			50
99 07 37	51387		45		39				51	37	40
99 08 09	51400	30				69		69	36	48	
99 08 10	51401		58		30				51	42	47
99 08 11	51402	37	59	58	48	52					
99 08 24	51415		54		37				51	47	41
99 08 31	51422	37	52				27		56	41	32
99 09 28	51450	32	42				46		47	49	38

Étude de la stabilité du repère de référence céleste

L'étude de la variabilité de la direction apparente des radiosources permet de mieux comprendre, et à terme de mieux maîtriser, la qualité métrologique du repère de référence céleste international ICRF (*International Celestial Reference Frame*), complément céleste de l'ITRF. Dans ce cas, contrairement à celui de l'ITRF, le VLBI est la seule source de mesures contribuant à la maintenance du repère.

L'ICRF repose sur l'observation VLBI de près de sept cents radiosources en bandes S et X accumulées depuis 1980, avec une intensification des programmes d'observation vers 1987, suivie d'une stabilisation aux alentours de deux cent mille observations par an.

Après avoir décidé d'une stratégie optimale pour le calcul, comportant notamment la sélection de quelque deux cents sources " de définition ", le groupe d'experts, auteurs de l'ICRF ont fixé l'incertitude plancher des coordonnées des radiosources à 0,25 mas.

Cette estimation s'appuie sur un bilan des incertitudes résiduelles associées à plusieurs effets perturbateurs, en particulier, ceux dus à la variabilité de la structure émissive de la gamme de sources utilisées, qui provoquent des variations de leur direction apparente. Nous avons effectué une étude de l'évolution temporelle de la direction de plusieurs dizaines d'objets de l'ICRF. Cette étude préliminaire suggère qu'il devrait être possible de caractériser spectralement la variabilité des radiosources extragalactiques d'intérêt astrométrique.

Une telle caractérisation permettrait, dans un premier temps, une critique interne de l'analyse VLBI d'un genre nouveau et, dans un deuxième temps, d'enrichir la réflexion sur le contrôle de la stabilité de l'ICRF. Dans une perspective différente, on peut envisager de relier ce type d'information à des modèles de mécanismes physiques donnant lieu à des variations de la structure d'émission de quasars.

Une étude globale du repère de référence est illustrée par le tableau C.4.14.1. À partir de séries de coordonnées annuelles de radiosources particulièrement bien observées, on établit des catalogues annuels dont on étudie l'évolution sous la forme de rotations infinitésimales autour des axes du système de coordonnées équatorial ($dA1$, $dA2$, $dA3$), en considérant deux sélections de sources en fonction de la densité de leur série d'observations.

La sélection la plus sévère retient un maximum de soixante-huit sources, la moins sévère en retient deux cent huit. Ces sources représentent l'essentiel des données sur lesquelles repose l'ICRF. Les déterminations des angles de rotation sont obtenues, d'une part, par les moindres carrés (norme L2) et, d'autre part, en norme L1, réputée moins sensible à la présence de données aberrantes.

La plus grande régularité temporelle de ces dernières solutions, comme leur accord mutuel meilleur que celui des solutions par moindres carrés entre elles indique que, même à l'échelle de l'année, le matériel observationnel sur les deux cents sources les mieux suivies est loin d'être homogène. Une telle étude devrait permettre d'élaborer des recommandations concernant la programmation ultérieure des sessions d'observation.

Publications

[DEHANT, FEISSEL 99] V. Dehant & M. Feissel : *Considerations concerning the non-rigid Earth*, (trente-sept auteurs), *Nutation Theory. Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 72, 245-310, 1999.

[DIAMENT, FEISSEL 99a] M. Diament & M. Feissel : *Astrométrie, Géodynamique et Systèmes de Référence*, rapport quadriennal 1995-1998 du CNFGG - UGGI, pp. 47-55, 1999.

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

[FEISSEL 99a] M. Feissel : *The new generation scientific services for geodynamics*, Université de Berne (CH), 4 décembre 1999.

[FEISSEL 99c] M. Feissel : *Report of IAG Section V " Geodynamics "*, IAG Travaux 1995-1998.

[MATHEWS et al 98] P.M. Mathews, B.A. Buffet, T.A. Heering & M. Feissel : *The magnetic coupling contribution to nutation*, Journées Systèmes de référence spatio-temporel 1998, Paris, septembre 1998.

[ROOSBEEK et al 99] F. Roosbeek, P. Defraigne, M. Feissel & V. Dehant : *The free core nutation period stays between 431 and 434 days*, in *Geophys. Res. Lett.* 26, 131-134, 1999.

Isabelle Melot

La liste suivante présente les références des publications issues du programme de recherche 1999. Elle reprend les références données dans les différents articles du Bulletin. On peut se procurer les publications en libre diffusion auprès du Service de la recherche :

Service de la recherche
Institut géographique national

2-4 avenue Pasteur
F-94165 SAINT MANDÉ CEDEX

téléphone : (33) 01 43 98 83 19
télécopie : (33) 01 43 98 81 71

adresse électronique : isabelle.melot@ign.fr

Thèses de doctorat

[BOUIN 99] M-N Bouin, *Traitement de données GPS en Antarctique : mouvements crustaux, systèmes de référence, rebond post-glaciaire*, thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, IGN, laboratoire LAREG, 1999.

[DUPONT 99] François Dupont : *Contribution à l'analyse automatique de documents géographiques scannés : extraction de l'altimétrie*, thèse de doctorat de l'Université Paris-9 Dauphine, spécialité : informatique, laboratoire MATIS, IGN-SR 990038/C-THE, soutenue le 17 novembre 1999.

[GONÇALVES 99] Gil Rito Gonçalves : *Qualités requises en modélisation numérique du relief : étude de l'équivalence entre le modèle cartographique et le modèle numérique*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité : Sciences de l'Information Géographique, laboratoire MATIS, IGN-SR 990020/C-THE, soutenue le 17 novembre 1999.

[RUAS 99] Anne Ruas : *Modèles de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 990009/S-THE, soutenue le 9 avril 1999.

[SILLARD 99] Patrick Sillard : *Modélisation des systèmes de références terrestres, contribution théorique et méthodologique*, thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, spécialité : Astronomie fondamentale, mécanique céleste et géodésie, IGN, laboratoire LAREG, IGN, laboratoire LAREG, soutenue le 12 mai 1999.

Articles de journal scientifique

[BADARD, SPERY 99] T. Badard & L. Spéry : *Problèmes liés à l'échange et à l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques*, in *Revue internationale de géomatique*, Editions Hermès, France, 18 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 990036/S-ART, 1999.

[BADARD, LEMARIÉ 99] T. Badard & C. Lemarié : *Propagating updates between geographic databases with different scales*, in *Innovations in GIS VII : GeoComputation*, P. Atkinson, and D. Martin, (Eds.), Taylor and Francis, London, 1999, 12 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 990033/S-ART, 1999.

[BOCK et al 99] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser & J. Pelon : *Multilateration with the wide angle laser ranging system : ranging performance and first ground-based validation experiment*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, n° 2, pp. 739-747, March 1999, Laboratoire OEMI, IGN-SR 990001/L-ART, 1999.

- [BOCK 99a] O. Bock : *Multilateration with the wide-angle airborne laser ranging system: positioning precision and atmospheric effects*, in Appl. Opt., vol. 38, n° 15, Laboratoire OEMI, IGN-SR 990002/L-ART, 20 mai 1999.
- [BONIN 99] Olivier Bonin : *Sensibilité des applications géographiques aux incertitudes : lien avec le contrôle qualité*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 70, 1999/3, pp. 71-76, IGN, Paris, 1999.
- [DE LA LOSA, CERVELLE 99a] A. de la Losa & B. Cervelle : *Présentation d'un modèle 3-D et analogies avec un modèle 2-D*, in Revue Internationale de Géomatique, laboratoire COGIT, IGN-SR 990003/S-ART, 1999.
- [DE LA LOSA, CERVELLE 99b] A. de la Losa & B. Cervelle : *Queries and visualization with a 3D GIS prototype*, in Computers & Graphics, laboratoire COGIT, IGN-SR 990004/S-ART, 1999.
- [DE LA LOSA, CERVELLE 99c] A. de la Losa & B. Cervelle : *3-D Topological Modeling and Visualisation for 3-D GIS*, in Computers & Graphics, volume 23 (1999), laboratoire COGIT, IGN-SR 990043/S-ART, 1999.
- [DUQUESNOY 99] T. Duquesnoy : *Étude géodésique d'un segment sismique de la Grande Faille de Sumatra (Indonésie)*, in Bulletin géologique, France, tome 170, n° 1, pp. 25-30, Laboratoire OEMI, IGN-SR 990004/L-ART, 1999.
- [EXERTIER, BARLIER, BONNEFOND, WILLIS 99] P. Exertier, F. Barlier, P. Bonnefond & P. Willis : *Techniques spatiales de la géodésie : DORIS, GLONASS et télémétrie Laser*, rapport quadriennal 1995-1998, Comité Français de Géodésie et de Géophysique, publication de l'Académie des Sciences, pp. 39-46, 1999.
- [GONÇALVES et al 99] G. Gonçalves, P. Julien, S. Riazanoff & B. Cervelle : *Le problème des courbes intercalaires dans la construction d'un MNT maillé à partir des courbes de niveau*, Colloque SIPT/ISPRS, WGII/6, " Production des données géographiques 3-D vers le respect des contraintes applicatives ", Paris (F), 7-9 avril 1999, in Bulletin de la SFPT n° 153 (1999/1), laboratoire MATIS, IGN-SR 990003/C-ART, 1999.
- [HANGOUËT 99a] J.-F. Hangouët : *La géographie dans l'automatisation de la généralisation cartographique*, in Bulletin du Comité Français de Cartographie n° 161, pp. 66-68, laboratoire COGIT, IGN-SR 990027/S-ART, septembre 1999.
- [HANGOUËT 99b] J.-F. Hangouët : *Généralisation cartographique automatique : approche et méthodes*, in Bulletin du Comité Français de Cartographie, n° 162, décembre 1999, pp. 61-70, laboratoire COGIT, IGN-SR 990046/S-ART, 1999.
- [RUAS 99] A. Ruas : *Modèle de généralisation de données urbaines à base de contraintes et d'autonomie*, in Revue Européenne de Géographie, <http://www.cybergeopresse.fr>, laboratoire COGIT, IGN-SR 990047/S-ART, 1999.
- [SOUCHON, THOM 99] J.-Ph. Souchon & Ch. Thom : *Apport de nouvelles technologies dans l'acquisition des données topographiques : les caméras numériques de l'IGN*, in Revue XYZ, n° 78, 1er trimestre 1999, pp. 24-30, Laboratoire OEMI, IGN-SR 990005/L-ART, 1999.
- [VAUGLIN 99a] François Vauglin : *A practical study on precision and resolution in vector geographical databases*, In Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99, Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 84-94, Hong Kong Polytechnic University, juillet 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990010/S-ART, 1999.
- [VAUGLIN 99b] F. Vauglin : *Precision versus resolution*, in GIM International, November 1999, vol. 13-11, laboratoire COGIT, IGN-SR 990025/S-ART, 1999.
- [VAUGLIN 99c] F. Vauglin : *Use of Variograms to Represent Spatial Uncertainty of geographic Linear Features*, in *Spatial Accuracy Assessment : Land Information Uncertainty in natural Resources*, ed. Kim Lowell, chapitre 19, Sleeping Bear Press/Ann Arbor Press, Chelsea Michigan, pp. 157-163, laboratoire COGIT, IGN-SR 990032/S-CHA, 1999.
- [WILLIS 99a] P. Willis : *IGEX-98 : La campagne internationale GLONASS*, in Revue XYZ, 81, 4, pp. 27-29, 1999, républié dans la Revue navigation, 48, 189, pp. 47-52, IGN/LAREG, janvier 2000.
- [WILLIS 99b] P. Willis : *IGEX-98 : International GLONASS Experiment*, GPS Solutions, J. Wiley, 3, 2, pp. 66-68, IGN/LAREG, 1999.
- [WILLIS, BEUTLER, GURTNER, HEIN, NEILAN, NOLL, SLATER 99] P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R.E. Neilan & J.A. Slater, *IGEX : International GLONASS Experiment, Scientific Objectives and Preparation*, Advances in Space research, Pergamon, in Satellite Dynamics, Orbit and Analysis and Combination of space techniques, J. Dow (Editor), 23, 4, pp. 659-664, 1999.
- [WÖPPELMANN et al 99b] G. Wöppelmann, S. Allain, P. Bahurel, S. Lannuzel & B. Simon : *Zéro hydrographique vers une détermination globale*, in Revue XYZ, n° 79, 2e trimestre 1999, pp. 27-34, IGN/LAREG, 1999.

Communications en congrès

- [ALTAMIMI et al 99] Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *ITRF97 and quality of IGS reference*, in Proceedings of the IGS Analysis Workshop 1999, SIO, La Jolla (USA), IGN/LAREG, 1999.
- [ALTAMIMI, BOUCHER 99a] Z. Altamimi & C. Boucher : *Recent Results of the International Terrestrial Reference Frame*, in Proceedings of the International Workshop on Geodetic Measurement by collocation of Space Techniques on Earth-GEMSTONE, pp. 15-20, CRL, Koganei, Tokyo (J), IGN/LAREG, 1999.
- [ALTAMIMI, BOUCHER 99b] Z. Altamimi & C. Boucher : *Scale Consistency between VLBI, SLR, GPS and DORIS Estimated Terrestrial Reference Frames*, International Symposium on GPS, Tsukuba (J), IGN/LAREG, pp. 18-22 octobre, IGN/LAREG, 1999.
- [BADARD 99a] T. Badard : *On the retrieval of correlation relationships to update geographic databases*, in submission to the 7th National
- [BADARD 99b] T. Badard : *On the automatic retrieval of updates in geographic databases based on geographic data matching tools*, in
- [BARILLOT 99] X. Barillot : *Généralisation automatique du linéaire : quelques outils pour mesurer la forme des routes*, 19th ACI/ICA Co
- [BEL HADJ ALI, VAUGLIN 99] A. Bel Hadj Ali & F. Vauglin : *Geometric Matching of Polygons in GISs and assessment of Geometrical C*
- [BEL HADJ ALI, VAUGLIN 99] Atef Bel Hadj Ali & François Vauglin : *Geometric Matching of Polygons in GISs and assessment of Geometrical Quality of Polygons*, in Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99. Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 33-43, Hong Kong Polytechnic University, laboratoire COGIT, IGN-SR 990012/S-COM, juillet 1999.

- [BEUTLER, WILLIS 99] G. Beutler & P. Willis : *The future of IGEX-98*, position paper, in Proc. IGEX-98 Workshop, Nashville (USA), IGN/LAREG, 13-14 septembre 1999.
- [BOCK 99] O. Bock : *First aircraft experiment results with the wide-angle airborne laser ranging system*, in *Laser Radar Ranging and Applications*, Springer, 1999.
- [BOFFET 99] A. Boffet : *Framework for Automated Spatial Analysis Based on Spatialization Principles, Progress and Developments in Automated Spatial Analysis*, Springer, 1999.
- [BOICHIS et al 99a] N. Boichis, J.-P. Cocquerez & S. Airault : *Road Intersection Automatic Extraction from Aerial Images : Application to the Paris Region*, in *Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99*, Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 132-143. Hong Kong Polytechnic University, juillet 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990011/S-COM, 1999.
- [BOICHIS et al 99b] N. Boichis, J.-M. Viglino et J.-P. Cocquerez : *Knowledge Based System for the Automatic Extraction of Road Intersections from Aerial Images*, in *Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99*, Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 132-143. Hong Kong Polytechnic University, juillet 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990011/S-COM, 1999.
- [BOLDO, LE MEN 99] D. Boldo & H. Le Men : *Orthophotographie avec bâtiments redressés*, RFIA'2000, laboratoire MATIS, IGN-SR 990008/C-COM, 1999.
- [BOUIN, VIGNY 99] M.-N. Bouin, C. Vigny, *GPS data analysis in Antarctica : a geodetic measurement of glacial rebound ?*, congrès de l'European Geophysical Society, IGN/LAREG, avril 1999.
- [CALAIS et al 99] E. Calais, E. Barroux, R. Bayer, O. Bellier, N. Béthoux, C. Champion, J. Chéry, P. Choukroune, G. Clauzon, F. Cotton, F. Mathieu, E. Doerflinger, T. Duquesnoy, J. Fréchet, J.-F. Gamond, J.-C. Hypolite, F. Jouanne, J. Martinod, L. Serrurier, J.-F. Stéphan, C. Sue, M. Tardy, F. Thouvenot, P. Tricard, G. Vidal, T. Villemin & C. Vigny : *Present-day strain field in the Western Alps*, Colloque Geofrance 3-D, Lyon (F), novembre 1999
- [COSTES, WILLIS, CRETAUX 99] M. Costes, P. Willis & J.-F. Crétaux : *DORIS : A contribution to IERS (International Earth Rotation Service)*, 50th International Astron. Congress, Amsterdam (NL), IGN/LAREG, 4-8 octobre 1999.
- [DANIEL et al 99] L. Daniel, S. Allain, C. Boucher, B. Simon & G. Wöppelmann : *SONEL - Towards a national integrated coastal sea-level monitoring system*, poster présenté à la 22^{ème} Assemblée générale de l'UGGI, Session U7 (Integrated Global Monitoring Networks), Birmingham (UK), IGN/LAREG, 18-30 juillet 1999.
- [DASSONVILLE et al 99] Laure Dassonville, François Vauglin, Antti Jakobsson & Claude Luzet : *Quality Management, Data Quality and Users, Metadata for Geographical Information*, in Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99, Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 132-143. Hong Kong Polytechnic University, juillet 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990011/S-COM, 1999.
- [FRITSCH 99] E. Fritsch : *Road Selection for Generalisation based on a Traffic Modelling*, Geocomp'99, laboratoire COGIT, IGN-SR 990052/S-COM, 1999.
- [FRITSCH, LAMY 99] E. Fritsch & S. Lamy : *Algorithmes de généralisation basés sur le lissage de la courbure*, 19th ACI/ICA Conference, 1999.
- [FUCHS, LE MEN 99a] F. Fuchs & H. Le Men : *Detecting planar patches in urban scenes*, in Proceedings of SPIE, Visual Information Processing, 1999.
- [FUCHS, LE MEN 99b] F. Fuchs & H. Le Men : *Building reconstruction through multi-primitive graph matching*, in Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Science, 1999.
- [GUIGUES 99a] L. Guigues : *Comparison of image segmentations using a hierarchical model for n-m regions matchings*, in Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Science, 1999.
- [GUIGUES 99b] L. Guigues : *A light propagation principle for parallel curves detection*, laboratoire MATIS, IGN-SR 990037/C-COM, 1999.
- [HANGOUËT 99a] J.-F. Hangouët : *Analyse spatiale et phénomènes géographiques*, Quatrièmes rencontres de Théo Quant, Besançon, 1999.
- [HANGOUËT 99b] J.-F. Hangouët : *Automated spatial analysis and the naturalness of Voronoi diagrams*, *Computational Cartography*, Dordrecht, 1999.
- [HANGOUËT, LAMY 99] J.-F. Hangouët & S. Lamy : *Automated Cartographic Generalization : Approach and methods*, in Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Science, 1999.
- [IHDE et al 99] J. Ihde, J. Adam, W. Gurtner, B. Harsson, W. Schlüter, and G. Wöppelmann : *Status Report of the EUVN*, EUREF TWG Meeting, held in Dresden, october 28-29, 10 pages, 1999.
- [JIBRINI et al 99] H. Jibrini, M. Pierrot Deseilligny, N. Paparoditis & H. Maître : *Automatic Building Reconstruction from Very High Resolution Aerial Images*, in Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Science, 1999.
- [JUNG 99] F. Jung : *Detecting New Buildings from Aerial Stereo Pairs at Different Dates*, ICCV'99, Kerkyra (Grèce), 21-24 septembre 1999, laboratoire MATIS, IGN-SR 990008/C-COM, 1999.
- [LAMY et al 99] S. Lamy, A. Ruas, Y. Demazeau, C. Baeijs, M. Jackson, W. Mackaness & R. Weibel : *AGENT Project : Automated Generalisation New Technology*, 5th EC-GIS Workshop, Stresa (I), 28-30 June 1999, in Proceedings, pp. 407-415, Edited by K. Fullerton, laboratoire COGIT, IGN-SR 990035/S-COM, 1999.
- [LE MEN, BOLDO 99] H. Le Men & D. Boldo : *Mosaïque automatique d'orthophotographies*, RFIA'2000, laboratoire MATIS, IGN-SR 990008/C-COM, 1999.
- [MARCHADIER, MICHELIN 99] J. Marchadier & S. Michelin : *Extraction de primitives linéaires connexes d'une carte de contours*, AFIG'99, 1999.
- [MOREL, WILLIS 99] L. Morel & P. Willis : *Systematics effects of Terrestrial Reference Frames on Mean Sea level Determination*, poster au SWT JASON 1999 à Saint-Raphaël (F), groupe POD/Geoid., IGN/LAREG, 1999.
- [MOREL, WILLIS 99a] L. Morel & P. Willis : *Systematic errors stations coordinates and Earth Orientation Parameters coming from on TOPEX precise orbit determinations*, poster au SWT JASON 1999 à Saint-Raphaël (F), groupe POD/Geoid., IGN/LAREG, 1999.
- [MUSTIÈRE et al 99] S. Mustière, J.-D. Zucker & L. Saitta : *Cartographic Generalization as a Combination of Representing and Abstracting*, in Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Science, 1999.
- [NOLL, RIES, SOUDARIN, WILLIS 99] C. Noll, J. Ries, L. Soudarin & P. Willis : *The DORIS Pilot Experiment*, poster présenté à l'American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco (USA), IGN/LAREG, décembre 1999.
- [RUAS 99] A. Ruas : *The Role of the Meso Level for Urban Generalisation, Progress and Developments in Automated Map Generalization*, ICA'99 Workshop, August 12-14, laboratoire COGIT, IGN-SR 990048/S-COM, 1999.
- [SALGÉ 99a] F. Salgé : *Systèmes d'informations géographiques, informations géographiques et infrastructures nationales de données spatiales*, ALSIG'99, Alger (Algérie), IGN/DAIE, 1999.
- [SALGÉ 99b] F. Salgé : *Future of Earth Observation Systems and the Impact of Metric Satellites on Mapping Agencies*, Cambridge (UK), 20-22 juillet 1999, IGN/DAIE, 1999.
- [SALGÉ 99c] F. Salgé : *Framework for the world - Framework for Europe - Framework for countries*, Beja (Portugal), 23 septembre 1999, IGN/DAIE, 1999.
- [SLATER, WILLIS, GURTNER, LEWANDOWSKI, NOLL, WEBER, BEUTLER, HEIN, NEILAN 99] J.A. Slater, P. Willis, W. Gurtner, W. Lewandowski, C. Noll, R. Weber, G. Beutler, G. Hein & R.E. Neilan : *The International GLONASS Experiment (IGEX-98) : Organization, Preliminary results and future plans*, in Proc. Institute of Navigation, ION-GPS99, Nashville (USA), septembre 1999.
- [THOM, SOUCHON 99] Ch. Thom & J.-Ph. Souchon : *The IGN digital camera system in progress*, Photogrammetric Week '99, pp. 89-94, 1999.
- [VAUGLIN 99] F. Vauglin : *A practical study on precision and resolution in vector geographical databases*, in Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality'99, Wenzhong Shi, Michael Goodchild & Peter Fisher (Eds), pp. 132-143. Hong Kong Polytechnic University, juillet 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 990011/S-COM, 1999.
- [VIGNY et al 99] C. Vigny, T. Duquesnoy, F. Jouanne, J. Ammann, M. Anzidei, J.-P. Avouac, F. Barlier, R. Bayer, P. Briole, E. Calais, J. Chéry, F. Cotton, F. Duquenne, K. Feigl, M. Flouzat, J.F. Gamond, A. Harmel, F. Jouanne, J. Martinod, L. Serrurier, J.-F. Stéphan, C. Sue, M. Tardy, F. Thouvenot, P. Tricard, G. Vidal, T. Villemin & C. Vigny : *Present-day strain field in the Western Alps*, Colloque Geofrance 3-D, Lyon (F), novembre 1999

M. Kasser, M. Laplanche, M. Le Pape, J. Martinod, G. Ménard, B. Meyer, J.-C. Ruegg, J.-M. Scheubel & G. Vidal : *Western Alps Crustal Deformation Monitored by Repeated GPS Surveys*, AGU, décembre 1999.

[WILLIS 99] P. Willis : *Présentation générale du GPS, perspectives pour le futur*, in Actes des conférences MARI Europe 99, Carrousel du Louvre, pp. 2-4, 27-29, IGN/LAREG, avril 1999.

[WILLIS 99a] P. Willis : *Positionnement par satellites GPS, des applications grand public aux applications scientifiques*, Conférence invitée, Espace et Société, L'Univers d'Ariane, Lycée E. Combes, Pons (F), IGN/LAREG, 19 octobre 1999.

[WILLIS, SLATER, BEUTLER, GURTNER, NOLL, WEBER, NEILAN, HEIN 99] P. Willis, J. Slater, G. Beutler, W. Gurtner, C. Noll, R. Weber, R.E. Neilan & G. Hein : *The IGEX-98 campaign, Highlighths and perspectives*, in Proceedings IUGG General Assembly, Birmingham (UK), July 1999, in IAG Proceedings (avec comité de lecture), à paraître Springer-Verlag, IGN/LAREG, 1999.

[WILLIS, SLATER, GURTNER, NOLL, BEUTLER, WEBER, NEILAN, HEIN 99] P. Willis, J.A. Slater, W. Gurtner, C. Noll, G. Beutler, R. Weber, R.E. Neilan & G. Hein : *The GLONASS IGEX-98 Campaign, from its genesis to its realization*, in Proceedings IGEX-98 Workshop, Nashville (USA), IGN/LAREG, 13-14 septembre 1999.

[WÖPPELMANN et al 99d] G. Wöppelmann, S. Allain, C. Boucher, S. Lannuzel, D. Maillard & B. Simon : *Continuous GPS monitoring at Brest and Marseille GLOSS tide gauges*, poster présenté à la 22^e Assemblée générale de l'UGGI, Session JSG11 (Sea-level changes and vertical ground movements), Birmingham (UK), 18-30 juillet 1999.

Rapports de stages

[BOUKHATEM 99] H. Boukhatem : *Extraction des mises à jour dans une base de données géographiques et propagation sur une base*

[COQUEREL 99] C. Coquerel : *Classifications de zones urbaines. Développement d'outils de classifications à partir de la BD Topo de l'*

[FOUQUÉ 99] L. Fouqué : *Simulation d'erreurs "réalistes" dans les bases de données géographiques vectorielles, DESS de mathéma*

[GERGIA 99] Y. Bergia : *Outils pour la segmentation d'images couleurs*, rapport de stage de DEA, laboratoire MATIS, IGN-SR 990035/

[LAGRANGE, LANDRAS 99] F. Lagrange & B. Landras : *Application des réseaux de neurones à l'apprentissage des valeurs paramétri*

[MADYER 99] Khalid Madyer : *Construction automatique d'une structure topologique tridimensionnelle*, rapport de stage DESS-IMOI, la

[SAMMUNEH 99] M. Sammuneh : *Intérêts scientifiques de la campagne GLONASS IGEX-98*, rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS14, juillet 1999.

[ZERHOUNI 99] R. Zerhouni : *Traitement et analyse des données de la campagne DORIS en Polynésie française*, rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS13, juillet 1999.

Rapports internes et comptes rendus

[AFFHOLDER 99] J.-G. Affholder : *Modélisation du linéaire routier et algorithmes de généralisation : état de l'art*, laboratoire COGIT, IG

[BADARD 99a] T. Badard : *Extraction des mises à jour dans une base de données géographiques et propagation sur une base de don*

[BADARD 99b] T. Badard : *Étude Route500*, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 990038/S-RAP, 1999.

[BADARD, RICHARD 99] T. Badard & D. Richard : *Livraisons des évolutions en XML - Document de travail*, 40 pages, laboratoire COG

[BOUCHER et al 99] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *The 1997 International Terrestrial Reference Frame (1997)*, IERS Technical Note 27, Observatoire de Paris, IGN/LAREG, 1999.

[FRITSCH, LEMARIÉ 99] Emmanuel Fritsch & Cécile Lemarié : *Recueil et synthèse de besoin en matière de représentations multi-éche*

[GAULUÉ, BOLDO 99] E. Gaulué & D. Boldo : *Obtention de paramètres physiques du sol (réflectance, géométrie) par modélisation phy*

[HENO 99] R. Heno : *Étude préalable à l'industrialisation de la production des MNE*, rapport interne, IGN, décembre 1999.

[HOTTIER 99a] P. Hottier : *Multi-corrélation ponctuelle et précision (Le Mans)*, rapport Interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 990024/C-R

[HOTTIER 99b] P. Hottier : *Multi-corrélation ponctuelle et précision sur Le Mans (caméra numérique, résolution 9 mm, focale 2700 pixe*

[JUNG 99] F. Jung : *Détection de nouveaux bâtiments dans des imageries*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 990027/C-RAP, 1999.

[LEMARIÉ 99a] C. Lemarié : *Proposition d'un modèle de données multi-échelles s'appuyant sur le modèle de données de renseigne*

[LEMARIÉ 99b] C. Lemarié : *Extraction des mises à jour dans une base de données géographiques et propagation sur une base cartog*

[LEMARIÉ 99c] C. Lemarié : *Étude TOP25*, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 990042/S-RAP, 1999.

[MAE-CNRS-ENS-IGN-IPGP-UPMC et INSIVUMEH 99] Collectif : *Active deformation & seismic hazards in Guatemala : the Polochic-Motagua Fault System, 1999 Geodetic Survey Report*, Laboratoire OEMI, IGN-SR 990003/L-RAP, 20 janvier - 2 février 1999.

[WEHRSTEDT 99] Y. Wehrstedt : *Orthophoto de la ville de Rennes par caméra numérique couleur, compte rendu de production de la fil*

[WILLIS 99] P. Willis : *DORIS Coordinating Center Report*, 1998 IERS Annual Report, pp. 104-112, Observatoire de Paris, IGN/LAREG, juillet 1999.

[WILLIS, SILLARD 99] P. Willis & P. Sillard : *Monitoring geocenter and scale variations using DORIS data, Monthly and weekly comparisons toward ITRF references*, IERS Techn. Note 25, pp. 105-115, Observatoire de Paris, IGN/LAREG, avril 1999.

[WÖPPELMANN et al 99a] G. Wöppelmann, C. Boucher & B. Simon : *Les rattachements et le suivi des marégraphes : la situation vue par l'IGN et le SHOM*, rapport rédigé pour la réunion du Conseil du GRGS du 13 avril 1999, publications du LAREG, Série Rapport, 27 pages, octobre 1999.

[WÖPPELMANN et al 99c] G. Wöppelmann, S. Allain, C. Boucher, L. Daniel, et B. Simon : *Présentation du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales - SONEL*, 40 pages, mai 1999.

[WÖPPELMANN et al 99e] G. Wöppelmann, C. Boucher, C. Bruyninx and P. Woodworth : *Continuous GPS positioning of tide gauges. Progress report on the survey*, in Rapport annuel du PSMSL pour 1999, accessible par le Web à l'adresse <http://www.pol.ac.uk/psmsl/psmsl.info.html>, 1999.