



HAL
open science

La recherche à l'Institut Géographique National : activité 1996

Serge Motet, Robert Mariani, Philippe Guérin, Renaud Ruskoné, Isabelle Jurvillier, Christian Thom, Mathieu Barrault, Emmanuel Fritsch, Laurent Raynal, Serge Botton, et al.

► To cite this version:

Serge Motet, Robert Mariani, Philippe Guérin, Renaud Ruskoné, Isabelle Jurvillier, et al.. La recherche à l'Institut Géographique National : activité 1996. Bulletin d'information N°68. 1997. hal-02372646

HAL Id: hal-02372646

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372646>

Submitted on 20 Nov 2019

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

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

BI

INSTITUT
GÉOGRAPHIQUE
NATIONAL

ISSN 0427 2218

BULLETIN D'INFORMATION DE L'IGN



Recherche 96

68

La recherche à l'Institut Géographique National

Activité 1996

La recherche en 1996

01 Classement IGN-SR : 970005/R-LIV

02 Livre

03 Nom et adresse du directeur de la publication :

Jacques POULAIN
IGN
2-4 avenue Pasteur
F-94165 Saint-Mandé CEDEX

04 Rédacteur en chef :

Serge MOTET
IGN
2-4 avenue Pasteur
F-94165 Saint-Mandé CEDEX

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 1996

07 Date d'édition : octobre 1997

13 Numéro 68

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

Résumé

Ce numéro traite des activités de recherche de l'Institut Géographique National-France en 1996. Il dresse un bilan des progrès réalisés en traitement d'images et de cartes scannées, en photogrammétrie, en instrumentation, en base de données géographiques, en cartographie et en géodésie. Il aborde plus particulièrement les sujets suivants :

- l'extraction de textures sur cartes géographiques scannées,
- l'interprétation conjointe de cartes scannées et d'images aériennes appliquée à l'extraction du réseau routier,
- l'extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte,
- la séparation des zones naturelles et construites sur les images aériennes,
- les caméras numériques de l'IGN,
- l'automatisation du positionnement des écritures linéaires sur une carte,
- la caricature cartographique des virages par lissage de la courbure,
- la gestion du temps dans une base de données topographiques,
- l'évaluation du nouveau modèle du logiciel de géodésie *Bernese Software*,
- les combinaisons de jeux de coordonnées de géodésie spatiale.

Mot-clé principal : Information géographique.

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

En couverture

Séparation des plages de sursol extraites des MNE urbains en zones bâties structurées (en rouge) et zones de végétation non structurées (en vert). L'algorithme est décrit en détail au chapitre B.4.

Table des matières

A. LA RECHERCHE A L'IGN	1
B. QUELQUES ACTIONS MARQUANTES	7
B.1 Extraction, par apprentissage supervisé, de textures sur cartes géographiques	7
Description d'une texture fine et apprentissage supervisé	7
Accélération des traitements : utilisation de quadrees et de la résolution réduite	10
Contrôle du découpage : critères d'homogénéité et frontières	11
Architecture globale de la segmentation	14
Résultats	14
B.2 Interprétation conjointe de cartes scannées et d'images aériennes : application à l'extraction du réseau routier	15
Prétraitement de l'image	17
Spécialiste carrefour	18
Spécialiste chaussée	20
Résultats	22
B.3 Vers une extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données géographiques	23
L'architecture du système	23
Le détail des différentes étapes	24
Évaluation des résultats	29
Conclusion	32
B.4 Séparation des zones naturelles et construites sur images aériennes	33
Une caractérisation locale	33
Applications	37
B.5 Le point sur les caméras numériques de l'IGN	39
Contexte - objectifs	39
État de la recherche en début d'année 1996	39
Mission sur Lyon du 22 juillet 1996	40
Nouvelles caméras	44
Perspectives pour 1997	44
B.6 Automatisation du positionnement des écritures linéaires	45
Nommer un objet linéaire	45
Les problèmes	46
La qualité intrinsèque d'une écriture	47
La recherche de positions possibles	50
La quantification de la qualité	51
Le traitement global	53
Conclusion et perspectives	54
Traitement en cours ... de traitement	54
B.7 Caricature des virages par lissage de la courbure	55
La caricature par lissage de la courbure	55
Le recalage des courbures lissées	56
Conclusion	63
B.8 Gestion du temps dans une base de données topographiques	65
Quels besoins pour la maintenance de bases de données topographiques ?	65
Quelques modèles de données temporelles	68
Le projet COMMUTER	72
Conclusion	74
B.9 Évaluation du nouveau modèle du Bernese Software	75
Calculs 1996	75
Résultats	79
Conclusions	84

B.10 Combinaisons de jeux de coordonnées de géodésie spatiale : un exemple-type d'estimation des composantes de la variance	85
Le système international de référence terrestre	85
Principe de l'estimation des composantes de la variance	87
Illustration des méthodes précédentes : retour sur le calcul de l'ITRF94	90
Limitations du modèle précédent	91
C. BILAN DES ACTIONS DE RECHERCHE	95
C.1 Image et photogrammétrie	95
C.1.1 Travaux généraux	96
C.1.2 Travail sur la planche de noir	96
C.1.3 Planche de bleu	99
C.1.4 Autres travaux	99
C.1.5 Comparaison d'un modèle à un couple d'images aériennes pour la détection de changement	102
C.1.6 Corrélation contrainte par modèle 3-D	103
C.1.7 Modélisation du terrain	104
C.1.8 Qualités requises en modélisation numérique du relief	104
C.1.9 Groupement perceptuel pour l'analyse d'images aériennes	105
C.1.10 Reconstruction des bâtiments à partir d'un plan 2-D	105
C.1.11 Apport des bases de données vecteur pour l'interprétation d'images	107
C.1.12 Apport des cartes scannées pour l'analyse de scène en imagerie aérienne : application à la détection du réseau routier	108
C.1.13 Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données cartographiques	109
C.1.14 Collaboration d'algorithmes monoscopiques et stéréoscopiques pour la restitution du relief	110
C.1.15 Applications semi-automatiques d'aide à la restitution de la BD TOPO	111
C.1.16 Étude préalable au passage en production d'outils semi-automatiques de saisie du réseau routier pour la BD TOPO	112
C.1.17 Equarrissage des bâtiments de la BD TOPO en vue des sorties cartographiques à grande échelle	112
C.1.18 Extension à l'altimétrie de la méthode du contrôle linéaire	113
C.2 Instrumentation	116
C.2.1 Télémétrie laser satellite, nouvelle génération	116
C.2.2 Métrologie laser aéroportée	117
C.3 SIG et cartographie	119
C.3.1 Base de données multi-échelles	119
C.3.2 Formalisation de la précision géométrique linéaire	120
C.3.3 Placement automatique des noms sur une carte	122
C.3.4 Généralisation automatique : recherches avec une approche à base de connaissances	123
C.3.5 Modélisation du linéaire routier	125
C.3.6 Problèmes liés à la généralisation de l'orographie	126
C.3.7 Maquette de généralisation	127
C.4 Géodésie	129
C.4.1 Amélioration de l'ITRF	129
C.4.2 Géoïde 130	
C.4.3 Positionnement DORIS	131
C.4.4 Étude des déformations tectoniques par méthodes géodésiques	132
C.4.5 GPS cinématique	133
C.4.6 Traitement de données GPS en Antarctique : mouvements du sol et technique de calcul	134
C.4.7 Systèmes de référence terrestres. Réalisations	139
D. PUBLICATIONS	141

Serge Motet

Ce bulletin dresse le bilan des actions entreprises en 1996 par l'Institut Géographique National (IGN) dans le cadre de sa mission de recherche.

Contexte

La mutation de la cartographie vers l'information numérique suscite un important développement des recherches en France et dans le monde. L'information géographique requiert, par sa nature, des analyses spécifiques.

La tendance générale d'informatisation se combine à d'autres changements profonds qui affectent l'acquisition et la gestion de l'information géographique : utilisation des satellites en positionnement, nouveaux capteurs électroniques, développement de la télématique.

L'IGN a une vocation statutaire à mener des recherches. Il est donc normal qu'il contribue à l'analyse, au développement et à la mise en œuvre des mutations de la cartographie.

Le rôle de l'IGN dans la communauté scientifique a toujours été tourné vers la recherche appliquée. En effet, l'IGN a une double mission de recherche et de production. Il est en mesure de renouveler les techniques de production et d'élaborer de nouveaux produits issus de la recherche. La recherche de l'IGN vise à une mise en application à moyen terme.

Objectifs

Les priorités de recherche s'inscrivent dans ce contexte. Plus précisément, la recherche anticipe la production de l'IGN, et tout particulièrement celle des bases de données géographiques. A ce titre, il est utile de noter que l'IGN a entrepris la constitution de la Base de Données Topographiques (BDTOPO) de précision métrique. Son achèvement à moyen terme permet d'engager des actions de recherche sur plusieurs années. L'IGN a édifié ses perspectives de recherche autour d'un processus cartographique futur, composé d'une succession de nouvelles techniques.

Instrumentation

En amont, ce processus commence par la prise de vue aérienne. La principale recherche dans ce domaine est la mise au point d'une *caméra numérique aéroportée*. Il s'agit d'un appareil de prise de vue utilisant une matrice CCD comme capteur. Ce capteur a une dynamique très supérieure aux clichés argentiques. Il s'insère beaucoup plus simplement dans un processus totalement numérique.

Image et photogrammétrie

L'IGN utilise des photographies aériennes pour saisir de l'information géographique en trois dimensions. Les photos sont utilisées pour :

- interpréter les photos et localiser les détails topographiques,
- obtenir une modélisation en trois dimensions par la vision stéréoscopique de deux images du même lieu prises de points de vue différents.

Les recherches s'appuient respectivement sur des outils d'analyse d'image numérique et sur les techniques photogrammétriques. Elles couvrent plusieurs aspects de la topographie.

Pour le plus long terme, on vise une automatisation complète de l'interprétation d'une photo. Pour une application à moyen terme, l'IGN étudie l'*aide à la saisie photogrammétrique* de la BDTOPO. Il met au point des outils d'analyse d'image pour une automatisation partielle des tâches de restitution.

En parallèle, le laboratoire de traitement d'image mène des études sur la *lecture automatique de cartes scannées*. On cherche à reconnaître les écritures et les symboles des cartes existantes, dans le but d'obtenir des bases de données simplifiées ou de s'appuyer sur les informations de la carte pour interpréter les photos.

Système d'Information Géographique (SIG)

La recherche est orientée vers la gestion de données localisées. Elle concerne principalement deux disciplines informatiques : les algorithmes et les bases de données. Elle est encouragée par les besoins de gestion des grandes

bases de données de l'IGN. Les axes de recherche sont :

- la modélisation et la gestion de la qualité,
- la gestion de l'historique des données, la conservation des états antérieurs,
- la fusion et la gestion de données de précisions différentes.

Pour mener à bien ces recherches, l'IGN s'est fortement impliqué dans les techniques de modélisation "orienté-objet".

Généralisation cartographique

C'est la dernière étape du passage au numérique. On vise ici à produire automatiquement, des cartes claires et lisibles à partir des bases de données. La cartographie automatique se compose de deux domaines :

- le placement des *toponymes* et,
- la *généralisation* qui concerne les représentations géométriques. Pour rendre compte des éléments géographiques significatifs, on doit insister sur certaines formes et simplifier les détails. Il faut aussi supprimer les superpositions et les confusions pour que la carte soit lisible.

Les options étudiées sont l'approche algorithmique et l'approche système-expert pour la résolution des conflits.

Géodésie

Les recherches sont menées dans des domaines où les compétences de l'IGN peuvent contribuer au rayonnement scientifique international du pays. Les thèmes de recherche sont :

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

Progrès en 1996

On peut les classer en six domaines :

- l'instrumentation,
- le traitement d'images aériennes et la photogrammétrie,
- la lecture automatique de cartes scannées,
- les systèmes d'information géographique,
- la cartographie automatique, la présentation graphique de l'information géographique,
- la géodésie.

Instrumentation

L'IGN travaille sur l'usage des lasers en métrologie. Une méthode de métrologie par laser aéroportée a été proposée en 1990 et expérimentée depuis 1992. En 1996, l'exploitation d'expériences sur le terrain a confirmé la faisabilité de mesures d'altitude avec cette méthode. En outre, les travaux en télémétrie laser sur satellite se sont poursuivis.

Concernant la caméra numérique aéroportée, l'IGN a développé en 1995 un prototype, basé sur un capteur matriciel de 3072 x 2048 pixels de Kodak. Cette caméra a réalisé deux missions : en janvier sur Amiens et en juillet sur Lyon. Elles ont prouvé la faisabilité d'une caméra et elles ont confirmé ses avantages : qualité radiométrique et délais de livraison des images. En outre, un second prototype a été construit. Le premier a été amélioré. On disposera donc de deux caméras avec un capteur de 4000 x 4000 pixels et un capteur couleur.

Analyse d'image aérienne et photogrammétrie

La modélisation en trois dimensions par corrélation sur deux photos a été poursuivie par la prise en compte de la continuité et de la pente du terrain. Par ailleurs, l'IGN a entrepris l'analyse des qualités d'une modélisation du relief.

Concernant l'analyse d'images pour la recherche de détails topographiques, l'IGN a exploré la méthode du groupement perceptuel. On s'est plus particulièrement intéressé à la contribution des informations radiométriques et à l'introduction de contraintes par cette méthode. Des recherches sont également menées sur les stratégies de coopération d'algorithmes et d'utilisation de connaissances *a priori*.

Trois points ont marqué l'année :

- Un embryon de système faisant contribuer la BDCARTO à l'extraction de routes sur photos aériennes a été développé.
- On a aussi étudié la contribution des cartes scannées à l'extraction de routes.
- Enfin, on a travaillé sur la coopération des algorithmes de reconnaissance sur une image avec des algorithmes de modélisation en trois dimensions. Une méthode d'extraction du sur-sol (bâti et végétation) a été mise au point.

En ce qui concerne l'aide à la saisie et l'automatisation partielle des tâches de restitution, deux actions importantes ont été entreprises :

- Le suivi semi-automatique de route développé en 1995 a été porté sur une station de saisie interactive.
- Un logiciel d'équarrissage des bâtiments a été développé.

Enfin, une action nouvelle a été entreprise sur la détection de changements par comparaison de deux images prises à des dates différentes ou par comparaison de données anciennes et d'une image récente. On vise à cerner les lieux où une mise à jour serait nécessaire.

Lecture automatique de cartes scannées

Depuis 1994, des études sont menées sur la reconnaissance des écritures et des symboles sur les cartes (essentiellement à 1 : 25 000). Les avancées pour 1996 concernent :

- l'amélioration de la reconnaissance de la toponymie par des règles syntaxiques,
- la recherche des habillages en utilisant leur position probable.

Il a été aussi évalué l'apport d'une base de données plus sommaire pour guider la reconnaissance des réseaux et des limites administratives. Enfin, on a mené des travaux spécifiques sur la reconnaissance des arbres et des talus, des routes et des bâtiments.

Système d'Information Géographique (SIG)

Les points marquants de 1996 sont :

- La constitution d'une base de données multi-échelle établissant des liens de correspondance entre représentations différentes d'un même détail topographique. Des mécanismes d'appariement ont été développés et optimisés.
- La recherche sur l'historique s'est orientée vers les problèmes de mise à jour, en particulier, ceux posés par leur diffusion.
- Des études statistiques sur des données de la BDTOPPO ont permis de valider un modèle de précision géométrique.

Cartographie

L'industrialisation des logiciels de placement des écritures horizontales a été poursuivie. De nouvelles études ont été menées pour le placement de noms de rues et celui des hydronymes. Concernant la généralisation, il a été choisi de donner la priorité aux petites échelles (1 : 100 000) et au réseau routier.

L'IGN a développé une plate-forme d'expérimentation. L'intégration de nouveaux outils de segmentation et de mesure s'est poursuivie.

En parallèle, un effort important a été consacré à la généralisation contextuelle, c'est à dire aux relations entre objets graphiques. Des études ont été menées à la fois sur les algorithmes (déplacements...) et sur les stratégies.

Géodésie

Il semble utile de souligner quatre points marquant l'année 1996 :

- L'activité importante des analyses DORIS et de la coordination de cette technique au sein de l'IERS assurée par Pascal Willis. La qualité de détermination du géo-centre des solutions mensuelles a poussé l'IERS à lancer une campagne internationale de détermination du géo-centre à partir des techniques capables de le faire : GPS, SLR et DORIS. Cette campagne s'accompagne de modélisations géophysiques afin de comparer ces modèles aux déterminations par géodésie spatiale.
- La publication de deux modèles de géoïde fins pour la France, par Z. Jiang et par H. Duquenne. Des travaux d'inter-comparaison et de validation sont entamés.

— La publication d'un guide GPS dans le cadre du groupe de travail CNIG sur le positionnement statique et dynamique présidé par Pascal Willis.

— Enfin Claude Boucher et Zuheir Altamimi se sont vus décerner le Prix de Cartographie de l'Académie des Sciences pour leurs travaux sur l'ITRF.

Moyens

Structure

L'IGN est un établissement public de l'Etat à caractère administratif, placé sous la tutelle du Ministre de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme.

Il a cinq grandes missions (décret du 12 mai 1981), dont « effectuer les recherches d'intérêt général correspondants aux activités précédemment citées » (activités de production).

Pour mener à bien cette dernière mission, l'IGN est doté d'une structure d'évaluation et d'orientation - le Comité Scientifique et Technique (CST) - et de quatre laboratoires.

Le CST est constitué en majorité de représentants des Ministères intéressés par la recherche à l'IGN. L'expertise scientifique est assurée par quatre *groupes* de travail.

Chaque groupe s'attache à une discipline particulière et comprend un représentant du CST, un membre de l'IGN et des scientifiques extérieurs à l'IGN.

Au sein de l'IGN, la *Direction Technique* (DT) assure la maîtrise d'ouvrage de la recherche. Elle s'appuie sur le *Schéma Directeur de la Recherche* qui fixe les thèmes de recherche.

La recherche est mise en œuvre à l'IGN. L'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), grâce à son laboratoire de géodésie, joue un rôle important. Les trois autres laboratoires dépendent du *Service de la Recherche* (SR).

La structure de recherche est donc formée de quatre *laboratoires*. Chaque laboratoire travaille dans une discipline particulière. Un groupe du CST est associé à chaque laboratoire :

Groupe 1 : Image et Photogrammétrie	Laboratoire MATIS
Groupe 2 : Instrumentation	Laboratoire LOEMI
Groupe 3 : SIG* et Cartographie	Laboratoire COGIT
Groupe 4 : Géodésie	Laboratoire LAREG

(* SIG = Système d'Information Géographique)

Un programme de recherche est présenté chaque année au CST par la DT en fonction du Schéma Directeur et des propositions des chercheurs. Ce programme est organisé par groupe. Il est ensuite divisé en actions de recherche (AR). Chaque AR a un responsable, un budget et un suivi comptable.

Évolution des effectifs

Depuis 1994, les effectifs des laboratoires suivent une progression limitée par rapport aux années précédentes, en accord avec le schéma directeur de la recherche. Ils sont passés de quarante-quatre à quarante-neuf chercheurs. La répartition est donnée par le tableau ci-dessous. Les effectifs du tableau incluent les thésards et excluent les stagiaires (qui sont au nombre d'une vingtaine).

tableau A.2 : évolution des effectifs de recherche

	Effectifs au 1/1/95	Arrivées (Départs)	Effectifs au 1/1/96	Effectifs au 1/1/97	Arrivées (Départs)
COGIT	13	6 (3)	16	17	2(1)
MATIS	16	3 (2)	17	15	3(5)
LOEMI	7	(1)	6	5	(1)
LAREG	8	4	12	12	0
Total	44	13 (6)	51	49	5 (7)

Répartition des moyens

Le tableau A.3 donne la répartition des moyens de recherche (et en particulier des effectifs présentés page suivante) dans les différentes actions.

tableau A.3 : répartitions des moyens sur les actions

Chapitre	Intitulé de l'action	Contribution
B.1	Extraction par apprentissage supervisé de textures sur cartes géographiques	6%
B.2	Interprétation conjointe de cartes scannées et d'images aériennes : application à l'extraction du réseau routier	7%
B.3	Vers une extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données géographiques	3%
B.4	Séparation des zones naturelles et construites sur images aériennes	Idem B.2
B.5	Le point sur les caméras numériques de l'IGN	7%
B.6	Automatisation du positionnement des écritures linéaires	1%
B.7	Caricature des virages par lissage de la courbure	2%
B.8	Gestion du temps dans une base de données topographique	2%
B.9	Traitements GPS (Cf. Evaluation du nouveau modèle du <i>Bernese Software</i>)	4%
B.10	Combinaisons de données de géodésie spatiale pour les systèmes de référence	1%
C.1.1-4	Lecture Automatique de Cartes Scannées	Idem B.1
C.1.5-10	Conception et mise en œuvre d'algorithmes pour la restitution 3-D	7%
C.1.11-17	Systèmes d'interprétation d'images aériennes	Idem B.2
C.1.18	Extension à l'altimétrie de la méthode du contrôle linéaire	2%
C.1.16	Etude préalable au passage en production d'outils semi-automatiques de saisie du réseau routier pour la BDTOPO	1%
C.2.1	Télémetrie laser satellite, nouvelle génération	1%
C.2.2	Métopologie laser aéroportée	3%
C.3.1	Base de données Multi-Echelles	3%
C.3.2	Formalisation de la précision géométrique linéaire	3%
C.3.3	Placement automatique des noms sur une carte	3%
C.3.4	Généralisation automatique : recherches avec une approche à base de connaissances	6%
C.3.5	Modélisation du linéaire routier	3%
C.3.6	Problèmes de généralisation en orographie	1%
C.3.7	Maquette de généralisation	3%
C.4.1	Amélioration de l'ITRF	2%
C.4.2	Géoïde	1%
C.4.3	Positionnement DORIS	2%
C.4.4	Etude des mouvements tectoniques actuels par méthodes géodésiques	2%
C.4.5	GPS cinématique	1%
C.4.6	Traitement de données GPS en Antarctique	2%
C.4.7	Systèmes de référence terrestres. Réalisations	2%

Pas de comptes-rendus dans ce bulletin :

Aide à la saisie de la BDTOPO	6%
Mise à jour de l'occupation du sol BDCARTO	2%
Centre serveur d'informations astronomiques et géodésiques	3%
Campagnes de mesures GPS	1%
Soutien aux réseaux IGS et IERS	2%
Base de données gravimétriques du BGI	3%
Systèmes de référence terrestres. Réalisations	2%

Publications

Une vingtaine d'articles écrits ou co-rédigés par des agents de l'IGN ont été publiés dans des revues.

Vingt-huit communications écrites ou co-rédigées par des agents de l'IGN ont été présentées dans des congrès ou conférences internationales. Une dizaine de présentations ont été réalisées dans des ateliers de groupes de recherche ou de sociétés savantes.

Contrats de recherche

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

— le projet Commuter du programme Esprit est piloté par Bull. Il a pour objet de gérer la mise à jour et l'historique de l'information géographique,

— le projet Geoserve du programme Télématique est piloté par Siemens. Il étudie l'échange d'information géographique par des réseaux télématiques.

Deux projets européens impliquant l'IGN se sont terminés en 1996 :

— projet Genegis, du programme Eurêka,

— projet Geo2Dis du programme Esprit.

Au niveau national, l'IGN participe activement à trois projets du Programme National en SIG : sur la gestion de l'historique, les bases de données multi-échelles et la qualité.

Enfin, l'IGN a mené une étude sur la lecture automatique de cartes.

Résultats académiques et relations avec l'Université

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

Quatre thèses de doctorat ont été soutenues en 1996 :

O. Bock	Etude et réalisation d'un télémètre laser aéroporté à champ large sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol. Etude de l'adaptation du système à un véhicule satellitaire.
Ph. Guérin	Apport des cartes topographiques pour l'analyse de scène en imagerie aérienne : application à la détection du réseau routier.
C. Plaz Janet	Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique (application aux routes).
R. Ruskoné	Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données géographiques.

Une habilitation à diriger des recherches a été soutenue :

H. Le Men	Cartographie semi-automatique de l'évolution de l'occupation des sols par télédétection.
-----------	--

Chercheurs invités

Avec le concours de la Direction de la recherche et des affaires techniques (DRAST) du Ministère de l'équipement, l'IGN a accueilli en 1996 :

— Dr Ching Y.Suen du 7 au 13 décembre 1996,

— Eberhard Gülch de l'Université de Bonn du 1er au 4 octobre 1996,

— D. McKeown du 30 septembre au 4 octobre 1996,

— Stefano Spaccapietra de l'Ecole Polytechnique Fédérale de lausanne du 22 au 28 février 1996,

— Sabin Timpf de l'Université Technique de Vienne du 5 février au 10 mars 1996.

B. Quelques actions marquantes

B.1 Extraction, par apprentissage supervisé, de textures sur cartes géographiques

Robert Mariani

Introduction

Nous décrivons dans ce qui suit, une méthode d'extraction de textures sur la planche de bleu. Les textures concernées sont des textures fines, composées de primitives de base ayant une répartition géographique régulière. Cette méthode est fondée sur l'apprentissage des textures, c'est-à-dire des primitives et de leur voisinage. L'extraction procède par classification des primitives munies de leur voisinage, puis par relaxation probabiliste. La première étape permet d'attribuer, de façon locale et pour chaque texture apprise, la probabilité qu'une primitive appartienne à cette dernière. La deuxième étape permet de corriger les fausses détections locales, en considérant le contexte lié à chaque primitive. Cette méthode est fiable mais très lente, car le nombre de primitives, pour la mer par exemple, est très important. Aussi, une classification rapide est d'abord effectuée dans les zones vérifiant un certain critère d'homogénéité, et ceci à un niveau de résolution fixé. Enfin, il est possible d'intégrer dans ce système, de nouvelles textures répondant aux spécifications définies ci-dessus. La première section donne les éléments descriptifs d'une texture et l'algorithme d'apprentissage associé. La deuxième section rappelle d'abord la notion de quadtree, définit ensuite l'utilisation d'une famille de quadtrees, et présente enfin leur utilisation dans ce contexte. La troisième section fournit les caractéristiques de textures associées à une feuille de quadtree ainsi que l'algorithme d'apprentissage utilisé. L'algorithme de relaxation est décrit dans la quatrième section. L'architecture globale de l'apprentissage supervisé et de l'extraction des textures est résumé dans la cinquième section, ceci avant de présenter les résultats et de conclure.

Description d'une texture fine et apprentissage supervisé

Nous définissons une texture fine comme étant un ensemble d'éléments similaires, répartis régulièrement sur le plan. Généralement, les éléments utilisés ici sont petits et espacés les uns des autres, d'une trentaine de pixels au maximum. Deux textures sont différentes si leur primitive de base sont différentes, ou si leur structure de voisinage sont différentes. Deux textures différentes peuvent partager la même structure de voisinage ou la même primitive de base.

Ainsi, une texture est décrite par sa primitive de base et sa structure de voisinage. La classification d'une primitive munie de son voisinage, se fera par classifications séparées de la primitive et du voisinage, puis par fusion de ces résultats intermédiaires. Dans un premier temps, nous décrivons la transformation que nous appliquons systématiquement à l'image, avant d'entreprendre l'apprentissage ou la reconnaissance. Il s'agit en fait de faire une analyse en particules connexes de l'image, de sélectionner les primitives de texture vraisemblables, et de construire explicitement les relations de voisinage. Cela fait l'objet de la section suivante. Ensuite, nous décrivons, pour chaque élément à classer, les caractéristiques géométriques choisies pour leur classification, et finalement l'opérateur de fusion.

Analyse en composantes connexes

Une étape indispensable consiste à filtrer l'image, en éliminant les composantes connexes qui sont grandes. L'objectif est de construire une image qui ne contient que les primitives de textures probables. La sélection est ici très sommaire (test de boîte englobante), car les primitives sont très petites (une vingtaine de pixels), et ont une forme compacte. Finalement, les éléments qui n'ont pas été retenus sont vectorisés par squelettisation et approximation polygonale. En effet, ils peuvent constituer les contours de certains objets surfaciques texturés. Ces frontières seront utiles par la suite.

Construction de la relation de voisinage et identification des points limites

La structure de voisinage est calculée par une triangulation de Delaunay, dont l'ensemble des points du plan à trianguler est constitué des barycentres des composantes connexes sélectionnées précédemment.

Cette description de la relation de voisinage, avec un graphe obtenu par cette méthode, est intéressante pour plusieurs raisons :

- il reflète bien la régularité du voisinage d'une primitive,

- le graphe est planaire, ce qui limite le nombre de primitives voisines (d'arêtes) pour une primitive donnée,
- il existe des algorithmes performants de triangulation de Delaunay,
- ce graphe de voisinage constituera le support de l'opérateur de relaxation probabiliste,
- la coloration finale de la texture (après segmentation) consistera à colorier les faces de graphe.

Enfin, nous appliquons les contraintes suivantes sur le triangulation. Elles permettent de limiter le nombre d'arêtes, et de considérer que deux primitives ne peuvent pas être voisines, si l'arête qui les relie passe par dessus une frontière. Ainsi, une arête est invalide si une des deux conditions suivantes est vérifiée :

- elle coupe une frontière,
- elle a une longueur supérieure à un seuil.

Caractéristiques géométriques d'une primitive

Ces primitives étant très petites et leur forme assez variable, le vecteur de caractéristiques les décrivant sera succinct. Il ne permettra pas, à lui tout seul, d'identifier une texture, mais permettra plutôt d'établir des préférences pour un ensemble de textures. Une deuxième raison qui explique ce choix, est que le nombre de primitives pour des textures fines est très important, ce qui pénalise le calcul d'un vecteur de caractéristiques complexes. Enfin, nous souhaitons que les ambiguïtés soient levées grâce au contexte fourni par le voisinage. Ainsi, chaque primitive est décrite par un vecteur contenant les caractéristiques suivantes :

- les longueurs du plus petit et du plus grand axe d'inertie,
- le nombre de pixels de la primitive,
- le rapport du plus grand axe d'inertie sur le plus petit,
- le rapport de la masse sur le produit des longueurs des axes d'inertie.

Ces données sont calculées à partir des moments d'ordre 2. Ensuite, la classification s'effectue au plus proche voisin, et les distances sont transformées en probabilités.

Caractéristiques géométriques du voisinage d'une primitive

Les caractéristiques géométriques du voisinage d'une primitive p portent sur une description de son voisinage d'ordre 2. Cette fois-ci, nous utilisons des mesures sur ce voisinage V et sur son enveloppe convexe E :

- aire (V) et aire (E),
- périmètre (V) et périmètre (E),
- $\pi^2 \cdot \text{rayon_min} (V)$, $\pi^2 \cdot \text{rayon_max} (V)$,
- $\pi^2 \cdot \text{rayon_min} (E)$, $\pi^2 \cdot \text{rayon_max} (E)$,
- distance (barycentre (E), barycentre (p)) / $\text{rayon_max} (E)$.

De la même façon, une classification au plus proche voisin est effectuée. Certaines primitives ont un voisinage mal défini, notamment, celles qui sont présentes près des frontières.

La classification de ces primitives sera toujours douteuse, aussi elles sont étiquetées comme *primitives limites*.

Classification par la distance de Mahalanobis

Soit X , le vecteur de caractéristiques décrivant un élément E . La classification de X s'effectue au plus proche voisin, au sens de la distance de Mahalanobis. En sortie, X se voit attribué un vecteur D contenant n valeurs, n étant le nombre de textures prédéfinies. Chaque valeur d_i de D est la distance de X à une classe particulière identifiant une texture t_i . Enfin, D est transformé en vecteur de probabilités d'appartenance de l'élément E à chaque texture t_i :

$$p(x \in t_i) = \frac{1 - \frac{d_i}{\sum_{j=1}^n d_j}}{\sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{d_k}{\sum_{j=1}^n d_j} \right)}$$

Avec d_i , la distance de X à la classe t_i , et n le nombre de textures du modèle. Dans notre cas, E est soit une primitive, soit son voisinage.

Fusion des classifications

L'objectif de cette opération est de prendre, pour une primitive munie de son voisinage, une décision finale quant aux probabilités d'appartenance de cet élément aux n textures définies. Chacune des deux décisions partielles constituant un vecteur de probabilités de n composantes, le problème se pose comme la classification du vecteur total de $2n$ composantes. Plusieurs méthodes d'apprentissage et de classification ont été testées :

- les méthodes classiques de distance au plus proche voisin,
- les k plus proches voisins,
- les moindres carrés,
- les réseaux de neurones.

Ce problème étant non linéairement séparable, le choix s'est porté sur le perceptron multicouche à interconnexion totale, entraîné par l'algorithme de rétropropagation du gradient. L'interconnexion totale est intéressante pour définir l'influence d'une probabilité sur toutes les autres. C'est ce modèle qui a fourni les meilleurs résultats. Ainsi, le réseau est constitué de :

- une couche d'entrée à $2n$ neurones,
- une couche cachée à $4n + 1$ neurones,
- une couche de sortie à n neurones,
- la fonction de transfert sigmoïde,
- paramètre d'apprentissage : $\alpha = 0,1$,
- intervalle $[-M, M]$ d'initialisation des poids de connexion avec $M = 0,19$.

La structure du réseau est fixée à partir de travaux théoriques qui définissent qu'un réseau de k neurones en entrée, $2k + 1$ en couche cachée et k en sortie, approche n'importe quelle fonction de séparation non linéaire d'un espace de dimension k (et donc du sous-espace de dimension $n = k/2$). Les poids des connexions sont initialisés aléatoirement dans un intervalle $[-M, M]$ afin d'optimiser l'apprentissage des poids. Les travaux théoriques de Burel ont permis de définir un mode de calcul de M . L'apprentissage supervisé s'effectue en fournissant au réseau, un vecteur d'entrée X et sa sortie désirée Y . Y est un vecteur de n composantes, dont une seule composante vaut un et les autres zéro. La i ème composante initialisée à un, indique que X appartient à la i ème texture définie dans le modèle.

La classification d'un vecteur en entrée X , s'effectue d'abord en calculant la sortie Y du réseau, et ensuite en déterminant la distance qui sépare Y de chacune des sorties désirées possibles. De nouveau, le vecteur des n distances obtenues, est transformé en vecteur de probabilités. Dans notre cas, les vecteurs de caractéristique définie plus haut, permettent d'obtenir une segmentation acceptable. Ce qui est important ici, c'est l'approche qui consiste à séparer les classifications, et à fusionner les résultats.

Cette approche est modulaire, et permet de redéfinir facilement, un classifieur de primitive ou/et de voisinage, plus sophistiqué.

Architecture de la classification

Le schéma suivant présente l'architecture du classifieur pour une primitive munie de son voisinage. Il commence à classifier indépendamment le vecteur de caractéristiques associé à la primitive, et celui associé à son voisinage. Cette classification s'effectue par le calcul de la distance de Mahalanobis minimale, séparant le vecteur prototype de chaque classe de texture, c_1, c_2, c_3 et c_4 . Après avoir transformé ces distances en probabilités, le vecteur de huit composantes, est fourni comme entrée au perceptron multicouche. Celui-ci délivre une sortie, qui est à son tour classifiée au plus proche voisin, avec les sorties désirées de chaque classe. Finalement, ce vecteur de distance est transformé en vecteur de probabilités, prêt à être manipulé par l'algorithme de relaxation probabiliste.

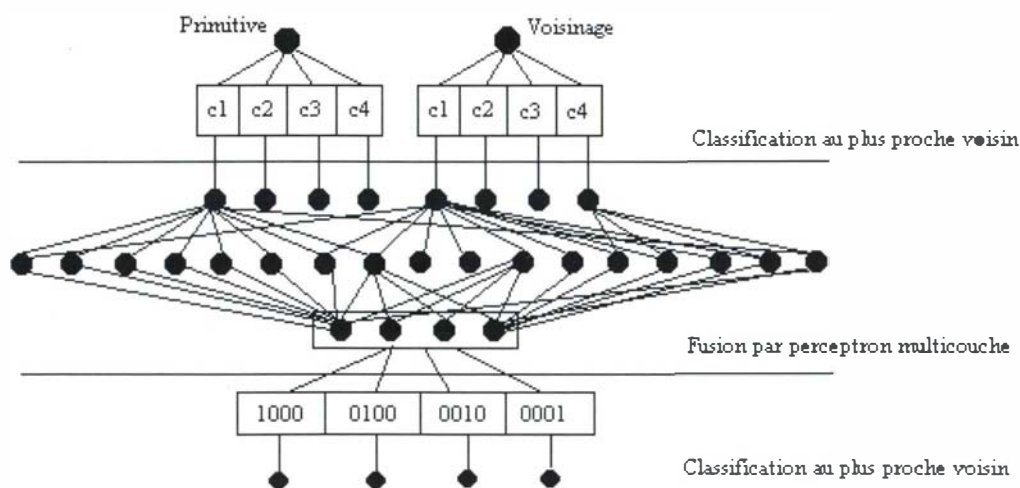


figure B.1.1

Accélération des traitements : utilisation de quadrees et de la résolution réduite

Les textures traitées ici contiennent beaucoup de primitives : les explorer une par une et établir la classification précédente, est une procédure très coûteuse en temps. Afin d'accélérer les traitements, nous allons exploiter un critère d'homogénéité des niveaux de gris que l'on peut aisément obtenir à un niveau K de résolution réduite.

De plus, nous allons utiliser des techniques rapides de parcours récursif d'image : les quadrees. Dans un premier temps, nous rappelons brièvement l'utilisation des quadrees.

Nous définissons ensuite le critère d'homogénéité utilisé au niveau de résolution K, et introduisons des contraintes supplémentaires qui permettront d'accentuer le contrôle du découpage de l'image.

Enfin, nous décrivons l'algorithme utilisant une famille de quadrees, et le moyen de classifier chaque feuille de quadree retenue.

Les quadrees

Les quadrees en analyse d'image, sont devenus des outils courants pour parcourir rapidement un espace de façon récursive.

Il permettent de faire simplement et rapidement un pavage du plan.

L'idée est de développer un arbre quaternaire sur l'image, chaque nœud identifiant une zone du plan.

Développer un nœud de l'arbre consiste à découper la zone en quatre parties égales, chaque partie étant affectée à un nœud fils. Trois cas se produisent au niveau d'un nœud (i.e. zone du plan) :

1. il vérifie un condition de validité : il n'est plus développé,
2. il vérifie une condition d'arrêt : il n'est plus développé,
3. les conditions 1. et 2. ne sont pas vérifiées, le nœud est développé.

Une image parcourue récursivement. Une feuille de quadree est découpée si elle contient une partie de l'objet noir. Le découpage s'arrête si la feuille de quadree ne contient rien ou si sa dimension est trop petite.

Généralement, la racine du quadree est l'image elle-même. De plus, la forme générique utilisée n'est pas forcément le carré ou le rectangle, et le découpage en quatre peut se faire autrement que verticalement et horizontalement, pourvu qu'à chaque découpage, les quatre formes génériques réapparaissent.

Dans ce qui suit, nous allons définir les contraintes, spécifiques à notre application, qui permettent de stopper le découpage récursif, d'accepter ou de rejeter une feuille de quadree.

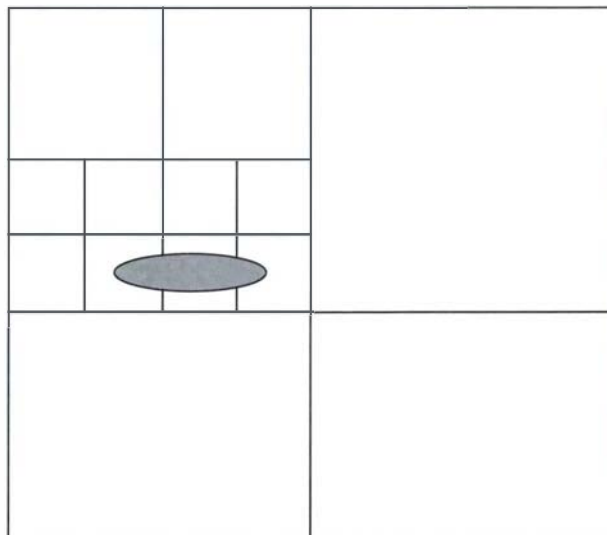


figure B.1.2

Contrôle du découpage : critères d'homogénéité et frontières

Le critère d'homogénéité des niveaux de gris, est déterminé à partir de l'image initiale, sur laquelle nous avons appliqué un filtre gaussien 2D de support K (ici $K = 20$). Ensuite, nous établissons pour chaque feuille de quadree, l'histogramme des niveaux de gris, lissé par un filtre gaussien 1D de support K. Ce dernier est normalisé et seules les valeurs supérieures à un seuil (ici 0,7) sont conservées. Enfin, la zone est déclarée homogène si :

- l'histogramme obtenu est unimodal,
- la plage de niveaux de gris qu'il représente est étroite,
- l'écart-type est faible.

Une autre caractéristique que nous utilisons pour contrôler le découpage, est la présence de frontières dans une zone de quadtree. Ce que nous cherchons, c'est optimiser la classification d'une zone de quadtree, tout en limitant au maximum les erreurs de classification. Or, un seul test sur les niveaux de gris ne suffit pas pour une grande zone globalement homogène, qui contient une petite zone perturbée par des contours. Près des frontières, les caractéristiques de régularité de voisinage ne sont plus respectées, et une frontière peut délimiter deux textures différentes. Aussi, la zone est retenue totalement valide si :

- elle est homogène,
- elle ne contient pas de contours.

Classification d'une feuille de quadtree

Les paramètres de classification choisis doivent être invariants au changement d'échelle, et même à la forme générique d'une feuille de quadtree. Les paramètres qui ont été retenus sont les suivants :

- poids total des primitives par unité de surface,
- nombre d'arcs par unité de surface,
- nombre de sommets par unité de surface,
- entropie de l'histogramme des fréquences de longueurs d'arcs.

Encore une fois, la classification est réalisée par un perceptron multicouche à interconnexion totale, entraîné par l'algorithme de rétropropagation du gradient. Les caractéristiques sont les suivantes :

- quatre neurones en couche d'entrée,
- neuf neurones en couche intermédiaire,
- n neurones en sortie,
- fonction de transfert sigmoïde,
- paramètre d'apprentissage : $\alpha = 0,3$,
- intervalle $[-M; M]$ d'initialisation : $M = 0,27$.

Utilisation d'une famille de quadtree

L'utilisation des quadtrees apportant un gain de temps considérable sur la classification, une idée naturelle consiste à utiliser séquentiellement, plusieurs quadtrees différents, afin qu'un quadtree utilisé à l'étape $p + 1$, porte sur une région non prise en compte aux étapes $1..p$. Dans notre cas, nous avons choisis huit quadtrees, dont quatre carrés, deux rectangles et deux rectangles inclinés. Les rectangles sont utiles pour passer dans des zones oblongues ou inclinées, comme les rivières. Nous partons de l'hypothèse que pour deux feuilles de quadtrees différents A et B, telles que $A \cap B \neq \emptyset$, les résultats de la classification de A et de B sont identiques. L'algorithme consiste donc à lancer tous les quadtrees, un par un, et à affecter à chaque sommet S du graphe de Delaunay (i.e. chaque primitive), l'indice de la plus grande feuille valide qui contient S .

Enfin, une feuille de quadtree n'est considérée que si :

- elle n'est pas incluse dans une feuille valide déjà retenue,
- elle est valide selon les critères précédents.

La figure suivante illustre cet algorithme : les trois sommets situés à l'intersection des feuilles de quadtree A et B seront affectés par le résultat de la classification de B et non pas de A.

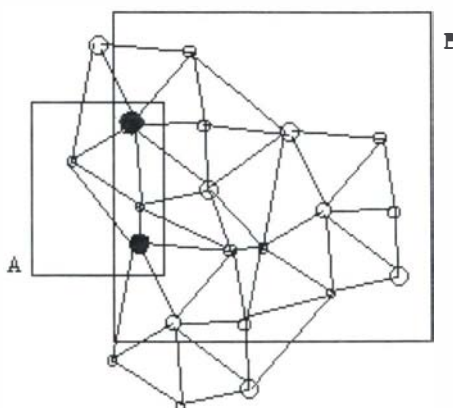


figure B.1.3

A la fin, nous parcourons la liste des feuilles retenues, et pour chaque feuille nous répercutons le résultat de sa classification sur l'ensemble des sommets qu'elle recouvre.

Relaxation probabiliste

La relaxation probabiliste s'effectue sur le graphe de Delaunay. Les sommets de ce graphe sont les primitives des textures. Les probabilités initiales des sommets sont fournies par les classifications précédentes. La relaxation va considérer les vraisemblances des probabilités en chaque sommet, en fonction des probabilités des sommets du voisinage. L'influence d'un sommet s1 sur un sommet s2 dépend de trois caractéristiques :

- les moyens par lesquels s1 et s2 ont été classifiés (quadtree, primitive, limite),
- la vraisemblance de la longueur de l'arc (s1, s2),
- la compatibilité prédéfinie entre une hypothèse-texture sur s1 et une hypothèse-texture sur s2.

Dans notre cas, nous considérons la relaxation sur les cliques d'ordre 1 et 2. Les longueurs théoriques des arcs, pour les deux cliques, ont été calculées pendant la phase d'apprentissage.

La classification globale par les quadtrees étant la plus sûre, l'influence de s1 sur s2 dépendra du moyen de classification des deux sommets.

Enfin, deux hypothèses de texture sont incompatibles (- 1) si elles sont différentes (sinon + 1). La méthode de relaxation utilisée est une variante de celle proposée par Rosenfeld :

En posant, $P_{ij}^{(r)}$, la probabilité que le sommet i ait l'étiquette j, à l'itération r. Alors, la probabilité calculée à l'étape r + 1 se définit comme :

$$P_{ij}^{(r+1)} = \frac{P_{ij}^{(r)} * (1 + Q_{ij}^{(r)})}{\sum_{k=1}^n P_{ik}^{(r)} * (1 + Q_{ik}^{(r)})}$$

$$Q_{ij}^{(r)} = \frac{\sum_{h \in V_i(j)} \sum_{k=1}^n f(i, j; h, k) * P_{hk}^{(r)}}{|V_i(j)|}$$

$$f(i, j; h, k) = \alpha * A(i, h) + \beta * B(i, h) + \delta * C(j, k)$$

Avec, $Q_{ij}^{(r)}$, la moyenne des influences de tous les objets dans l'ensemble des points du voisinage $V_i(j)$. La fonction $f(i, j; h, k)$ mesure la compatibilité entre la classification du sommet i à l'étiquette j sachant que le sommet h a l'étiquette k. Ici f, est une fonction linéaire qui dépend de :

- A(i, h) : influence du moyen de classification du sommet h sur le sommet i,
- B(i, h) : vraisemblance de l'arc (i, h), si (j = k),
- C(j, k) : compatibilité des étiquettes,
- α, β, δ : trois paramètres de pondération.

Dans notre cas, nous avons défini deux matrices A(i, h), selon que i et h sont supposés appartenir à la même texture ou pas. Cela consiste à définir que si h a été classifié par les quadtrees, alors il influencera fortement l'hypothèse-texture du sommet i, voisin de h. Cette forte influence pourra, soit renforcer l'hypothèse si les deux hypothèse-texture sont identiques, soit l'affaiblir dans le cas contraire. Réciproquement, si le sommet i est classifié par un quadtree, il sera beaucoup plus résistant aux influences antagonistes provenant des autres sommets h. Dans l'ordre des forces d'influence ou de résistance, nous avons :

- les quadtrees,
- le classifieur de primitive,
- les sommets limites.

Avec le même raisonnement, B(i, h) mesure la vraisemblance de l'arc (i, h) selon le modèle de texture appris. Pour une texture donnée, cette vraisemblance se mesure en fonction de la longueur de l'arc (i, h) par rapport à la longueur moyenne d'un arc de la texture considérée, pour une clique donnée. Ainsi, lorsque i et h sont supposés appartenir à la même texture, B(i, h) influencera plus ou moins la probabilité pour que i appartienne à cette texture. Typiquement, lorsque l'arc est trop grand ou trop petit, l'influence sera nulle. Lorsque i et h sont supposés appartenir à deux textures différentes, cette influence sera égale à - 1. Nous avons choisi :

$$B(i, h) = \begin{cases} \exp \left(\frac{-1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right) & \text{si } j = k \\ -1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec x, la longueur de l'arc (i, h), et (μ, σ) la moyenne et l'écart-type de la longueur d'un arc pour la texture considérée, et dans la clique de voisinage considérée.

Remarque : cette mesure n'est valide que lorsque les sommets voisins d'un sommet donné, sont quasi-équidistants. Une extension peut s'effectuer en considérant un ordre (par exemple trigonométrique) sur le voisinage, et avoir ainsi des longueurs moyennes d'arc dans des directions privilégiées.

Enfin, $C(j, k) = 1$ si $j = k$, et -1 sinon. Les coefficients α , β , δ ont respectivement été choisis à $(6, 2, 1)$, et le paramètre Q est normalisé en le divisant par $9 (= 6 + 2 + 1)$.

Croissance de régions

Cette étape est la plus délicate du processus. Elle fait intervenir la connaissance à priori sur les textures représentées sur la carte. Actuellement, elle est en cours de réalisation. Les régions sont des composantes connexes du graphe de Delaunay, chaque composante ayant un attribut de texture. Deux composantes connexes sont adjacentes si elles sont reliées par au moins un arc du graphe qui ne traverse pas un contour.

Des attributs de régions sont calculés et seront pris en compte dans l'opération de fusion :

- la moyenne des probabilités initiales,
- l'homogénéité radiométrique,
- l'aire et le périmètre,
- le nombre de sommets et d'arcs.

Enfin, nous nous focalisons sur deux types d'erreurs :

- les petites régions,
- les régions proches des bords.

L'optimisation se fera par relaxation probabiliste sur le graphe d'adjacence des régions.

Coloriage des faces

Cette opération est très simple. Elle consiste pour chaque sommet, à parcourir les voisins d'ordre 1, dans un ordre trigonométrique.

La liste des sommets voisins est ainsi ordonnée. Soit s un sommet, et $s_0, s_1, \dots, s_n, s_{n+1}$ la liste cyclique ($s_{n+1} = s_0$) de ses sommets voisins. Nous colorions tous les triangles de la forme (s, s_i, s_{i+1}) si les trois sommets appartiennent à la même texture.

Architecture globale de la segmentation

L'opération se résume en sept étapes ordonnées :

- analyse en composantes connexes, vectorisation des frontières, triangulation de Delaunay, et marquage des *primitives limites*,
- classification récursive des feuilles de quadrees, par perceptron multicouche,
- classification des *primitives non limite*, qui n'ont pas été considérées par les quadrees,
- classification, sur des critères de forme des *primitives limites*,
- relaxation probabiliste sur le graphe de voisinage de Delaunay,
- croissance de région, pour éliminer les fausses détections,
- coloriage des faces du graphe.

Résultats

Cette méthode fonctionne bien dans les zones où les textures sont bien représentées. Ce n'est pas le cas pour les rivières fines, ou parfois seule une primitive isolée est représentée, dépourvue de son voisinage. Dans les exemples suivants, nous avons appris les textures de la mer, de l'estran, des rochers... Au total, quatre textures différentes, dont une est aléatoire puisque elle est une représentation réaliste des rochers. Dans le cadre de l'application, il semble coûteux de segmenter des textures très fines, comme la mer par exemple, avec cette méthode.

Ainsi, nous disposons de plusieurs algorithmes de marquage de la texture :

- pour les textures très fines,
- pour les autres.

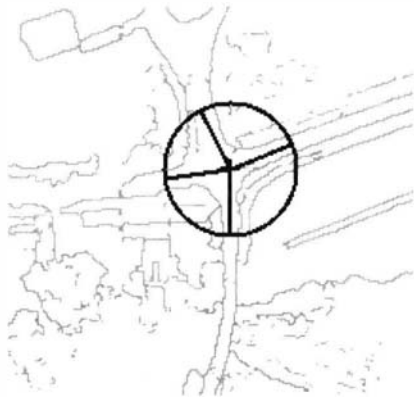
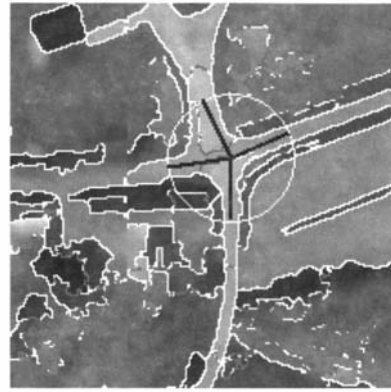
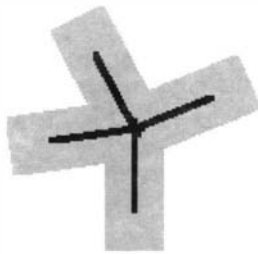


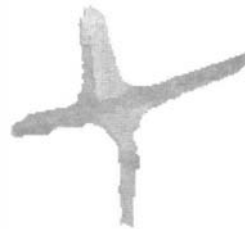
image initiale



lissage gaussien et contours



triangulation de Delaunay



segmentation

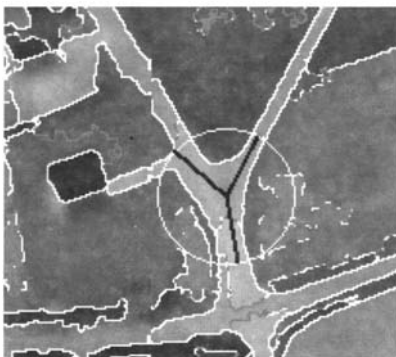
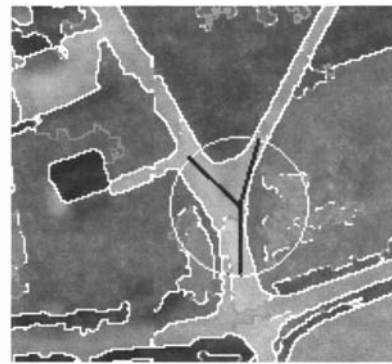
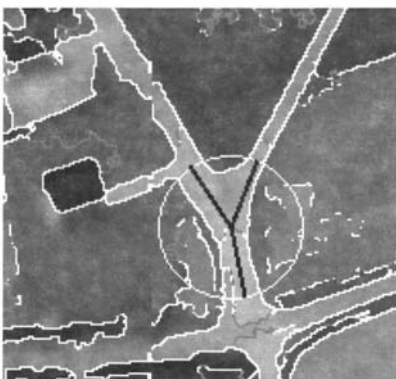


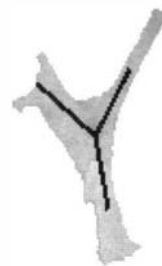
image initiale



lissage gaussien et contours



triangulation de Delaunay



segmentation

B.2 Interprétation conjointe de cartes scannées et d'images aériennes : application à l'extraction du réseau routier

Ghislaine Bordes et Philippe Guérin

Avant-propos

Cet article a été rédigé à partir de la thèse de Philippe Guérin, thèse de l'université Paris-7, Denis Diderot, soutenue le 4 octobre 1996 [GUÉRIN 96b]. Les illustrations sont extraites du mémoire de thèse.

Résumé

Dans ce travail, une analyse des mécanismes et des difficultés de l'interprétation automatique d'images aériennes est présentée, en la rapportant tout d'abord aux concepts de la photo-interprétation humaine.

Pour surmonter les obstacles de l'analyse tout-automatique des scènes aériennes, les potentialités des cartes topographiques sont évoquées en tant qu'outil de compréhension de l'image.

La spécificité des cartes topographiques est soulignée par rapport à d'autres sources d'informations externes et d'autres types de cartes.

En effet, chacune de ces sources de données a une vocation qui se traduit par des spécifications de contenu adaptées et un certain niveau de précision géométrique et sémantique.

Pour connaître la nature et le contenu de la carte topographique au 1 : 25 000 de l'IGN, un inventaire des éléments caractéristiques de cette carte est constitué, de même qu'une évaluation de la qualité du thème routier.

Les résultats de cette étude ont montré l'adéquation entre le contenu de la carte et les spécifications attendues de restitution de l'image vis-à-vis de l'objectif recherché, l'acquisition de la BDTOP.

Les déformations existant entre la carte et le terrain nominal ont été caractérisées, tant au niveau des chaussées que des carrefours :

- estimation de l'amplitude des déplacements,
- comportement statistique des déformations,
- classification et hiérarchisation des configurations favorables ou défavorables à un bon positionnement dans la carte.

Globalement, la précision géométrique sur les carrefours est de 9,5 mètres en écart-type et celle pour les arcs est de 5,2 mètres (valeur plus faible due à la méthode de mesure au plus proche voisin avec l'arc de référence).

En tenant compte de la qualité et de la précision des informations que peut apporter la carte topographique, le choix méthodologique d'emploi de la carte s'est porté sur une approche descendante (c'est-à-dire partant de la connaissance externe pour guider et contraindre les détectations dans l'image).

Elle consiste à opérer un simple recalage du réseau routier de la carte dans l'image, sans remise en cause de la topologie initiale.

Le problème de la détection des routes dans l'image revient à positionner le centre des carrefours et à ajuster le tracé des chaussées par un déplacement latéral de son axe.

Ces deux actions (remplacement des carrefours et ajustement des chaussées) sont assurées par des opérateurs spécialistes. Leur lancement est contrôlé par un séquenceur.

Une phase de prétraitement amorce le déroulement du système. D'un côté, la carte est vectorisée pour extraire le graphe des routes. Cette vectorisation utilise les travaux présentés dans [PIERROT 94].

De l'autre, l'image aérienne subit une succession d'opérations pour mettre en valeur les traits caractéristiques des chaussées : homogénéité du revêtement (rehaussée par un lissage de l'image) et contraste des bords de la chaussée avec les surfaces avoisinantes (détection des lignes de fort gradient) (voir planche B.2.1).

Le remplacement des carrefours par l'opérateur spécialiste est ensuite lancé. Les intersections sont des primitives complexes, sémantiquement riches, qui assurent au système un faible risque de fausses détectations pour une configuration proposée par la carte.

De plus, un carrefour détecté autorise le remplacement d'au moins trois chaussées par restitution de leurs extrémités (voir planches B.2.2 à B.2.4).

Enfin, le spécialiste chaussée propage le recalage des arcs à partir des intersections détectées en intégrant des contraintes radiométriques et géométriques fortes (voir planches B.2.5 à B.2.11).

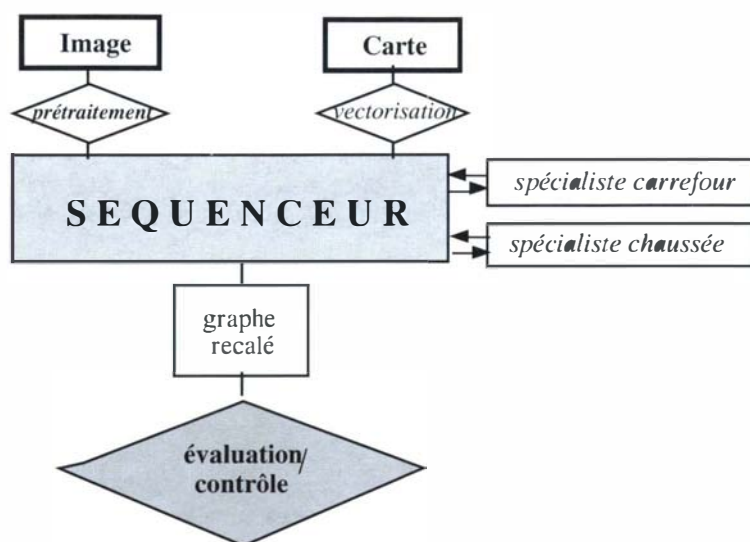
En sortie du système, on obtient un graphe corrigé des routes, les arcs représentant l'axe médian de la surface visible des chaussées, les nœuds représentant le centre d'inertie de la surface du carrefour.

L'emprise des chaussées et des carrefours est également disponible (voir planche B.2.12).

A partir du graphe recalé, des données initiales et d'un réseau de référence, une évaluation de la fiabilité des résultats obtenus par le système est opérée, afin d'assurer un contrôle réel sur les extractions.

Le module de contrôle et d'évaluation cherche avant tout à pouvoir entériner des extractions qualifiées de fiables, quitte à ne conserver qu'une portion réduite du réseau, mais dispensant à un opérateur humain de revenir sur le travail effectué par la machine.

Ce contrôle passe par une analyse du déroulement du processus, et par une qualification aussi bien globale que locale des détectations.



Prétraitement de l'image

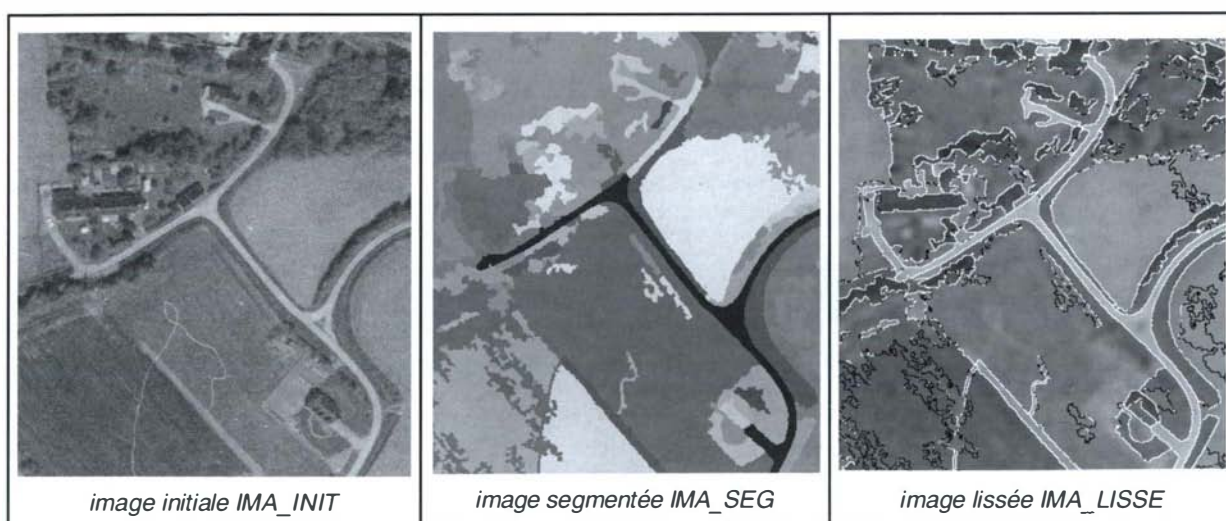
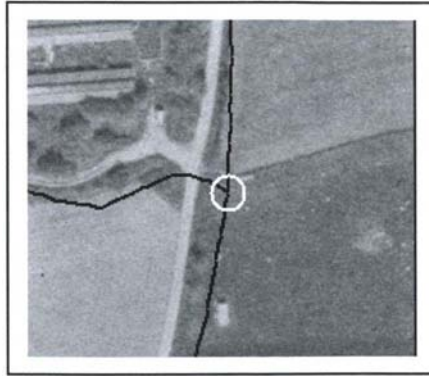


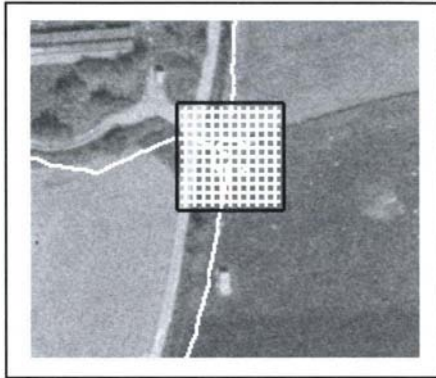
planche B.2.1 : phase de prétraitement

(sur IMA_SEG, les niveaux de gris sont répartis aléatoirement en chaque région pour mieux les distinguer; sur IMA_LISSE, les contours de fort gradient sont superposés en blanc et les contours.

Spécialiste carrefour

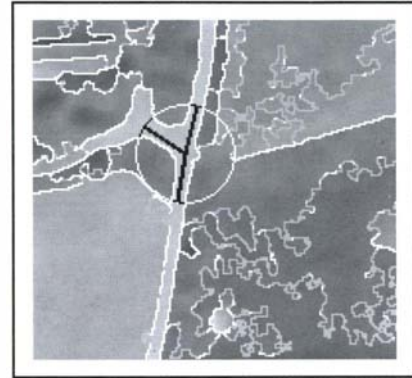


Position du carrefour dans la carte.



Grille d'analyse autour du carrefour carte.

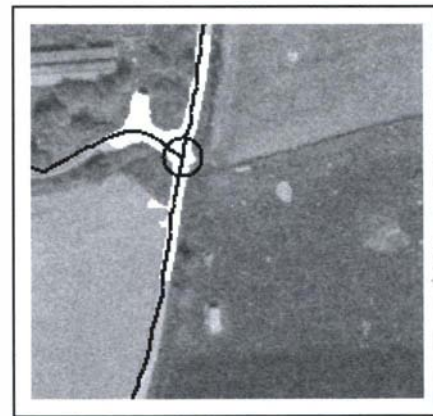
Largeur de la grille = 50 mètres : c'est le décalage maximum observé après l'évaluation des déformations entre carte et terrain pour les carrefours. Pas de la grille = cinq mètres.



Pour chaque position (x, y) de la grille, on analyse le profil radiométrique circulaire de centre (x, y) et de rayon 25 mètres. Des hypothèses de branches du carrefour sont générées et confrontées au carrefour-carte (voir planche B.2.3).



L'emprise du carrefour est extraite dans l'image prétraitée, un critère de qualité de centrage des branches dans cette emprise est calculé.



La position retenue du carrefour est celle qui présente le meilleur critère de qualité sur l'ensemble des points de la grille d'analyse.

planche B.2.2

Illustration du processus global de recalage d'un carrefour.

(Une fois trouvée la position optimale, le processus est réitéré avec une grille d'analyse plus fine : (largeur : vingt mètres, pas de la grille : deux mètres).

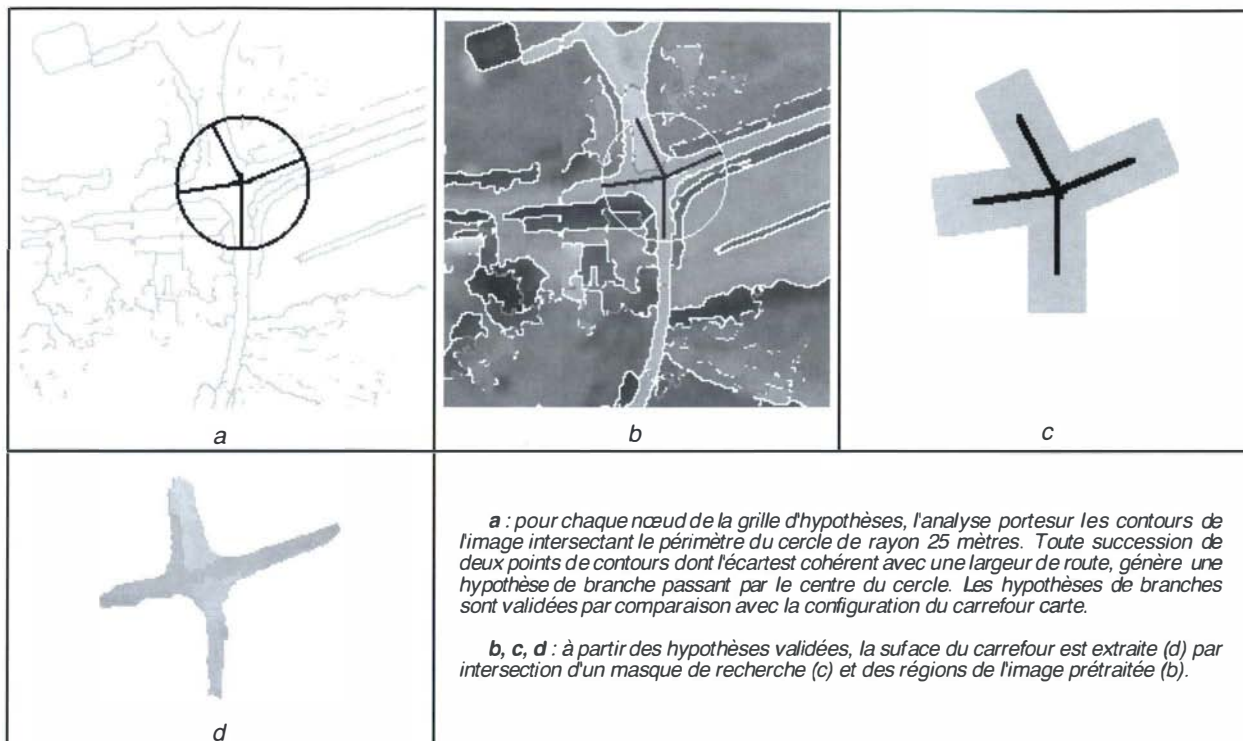


planche B.2.3

Processus de détection d'un carrefour à partir d'une position de test

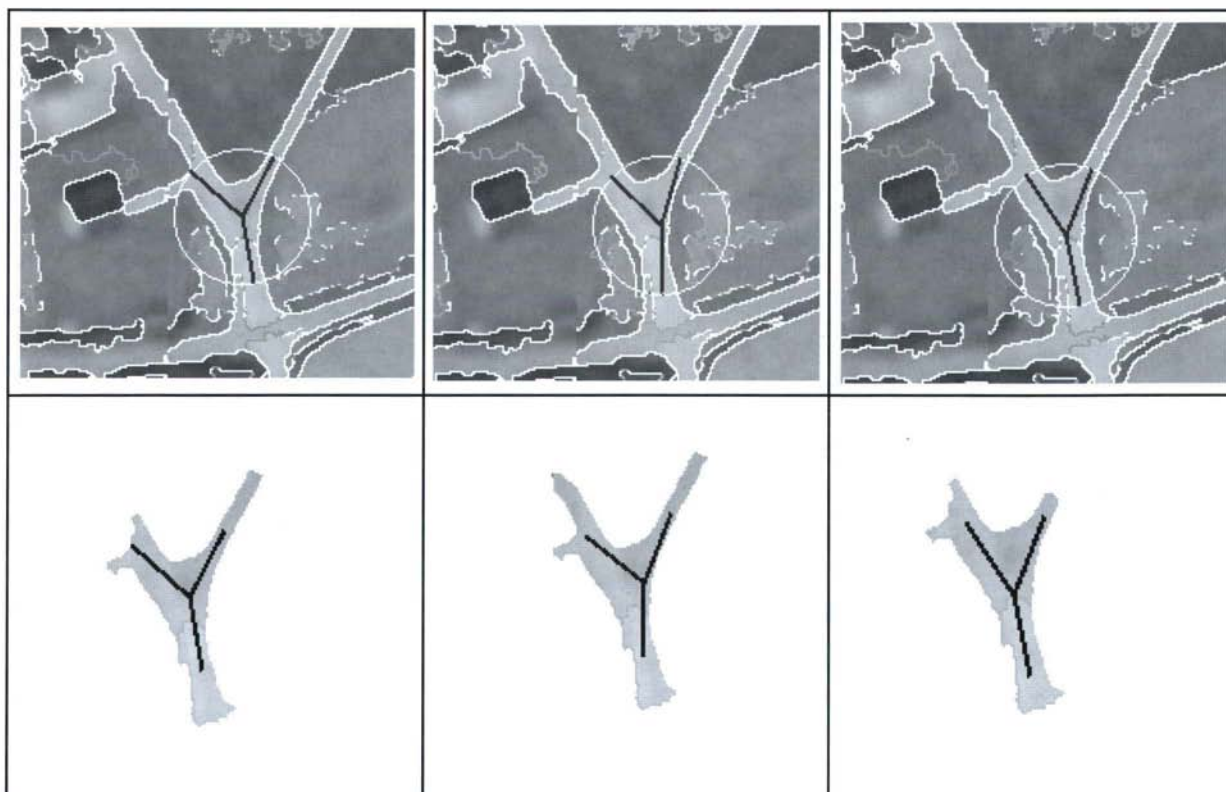


planche B.2.4

Exemples de configurations détectées pour trois nœuds de la grille d'analyse d'un carrefour

Spécialiste chaussée

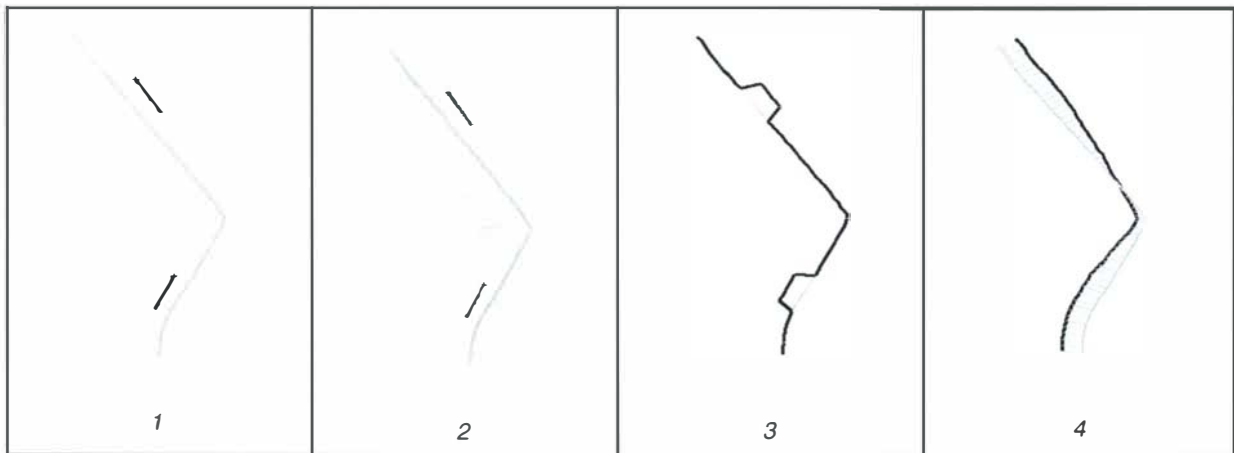


planche B.2.5 : principe général du recalage des arcs. Des primitives routières sont extraites dans l'image, l'arc-carte est recalé au mieux sur ces primitives tout en conservant un aspect proche de sa forme d'origine.

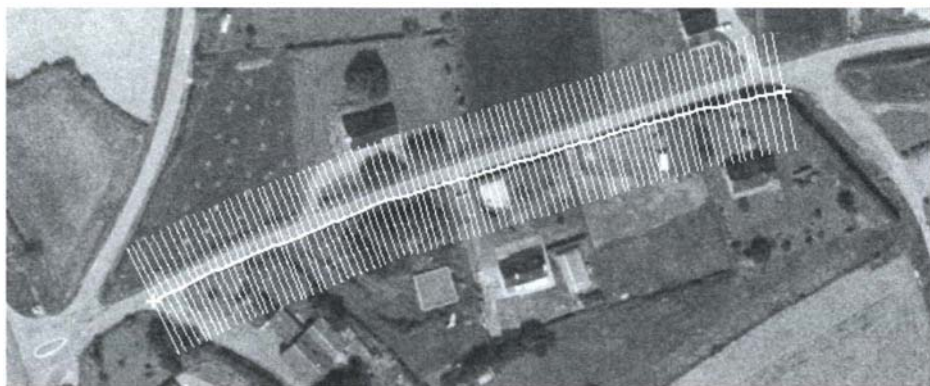


planche B.2.6

L'analyse de l'image sera faite sur les profils orthogonaux d'un ensemble de points régulièrement répartis sur l'arc-carte (en blanc). La largeur des profils d'analyse tient compte des décalages observés lors de l'étude des déformations du réseau routier de la carte.

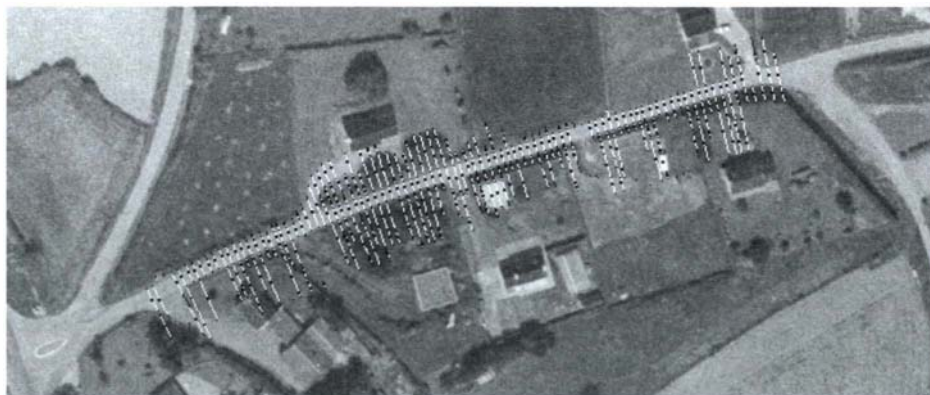


planche B.2.7

Pour chaque sommet de l'arc, l'analyse des contours de l'image prétraitée le long du profil orthogonal fournit des positions candidates pour le recalage. Comme pour la génération des hypothèses de branches de carrefour (cf pl. B.2.3), nous nous recherchons des paires de points de contours consécutifs dont l'écartement est cohérent avec la largeur attendue de la route. En noir sur l'image, les centres de ces paires de contours fournissent les hypothèses de centre de la chaussée.

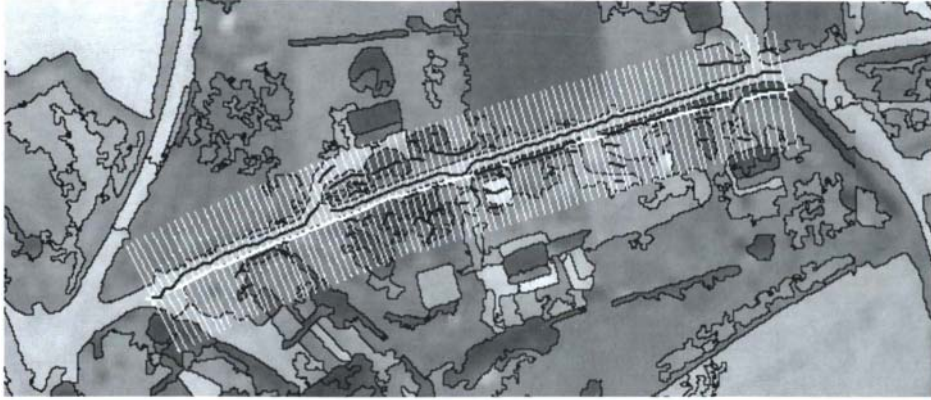


planche B.2.8

Les hypothèses de centre de la chaussée à recaler (en blanc sur l'image) sont chaînées pour constituer des primitives linéaires (en noir). Deux hypothèses sont connectées lorsqu'elles appartiennent à la même région de l'image prétraitée et si l'aspect de la chaîne ne s'éloigne pas trop de l'aspect de l'arc-carte.



planche B.2.9

Ensemble des chaînes générées

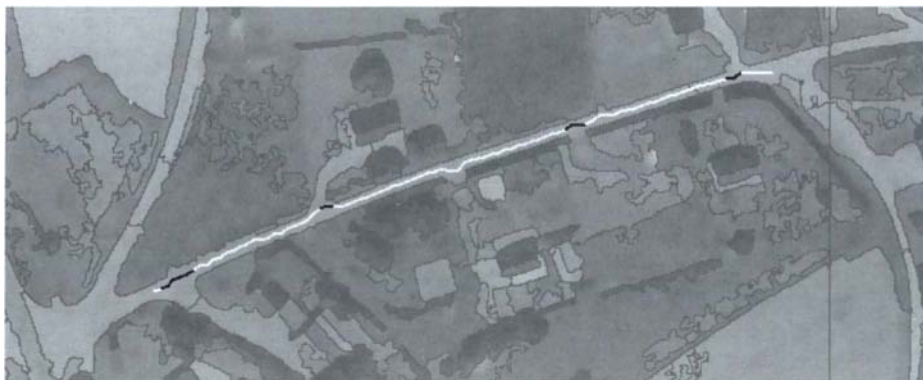


planche B.2.10

Le sous-ensemble de primitives le plus cohérent est sélectionné sur des critères de géométrie, de radiométrie et par rapport à la configuration de l'arc-carte. En noir figurent les portions de chaîne inter-polées en recalant l'arc-carte sur les primitives retenues.

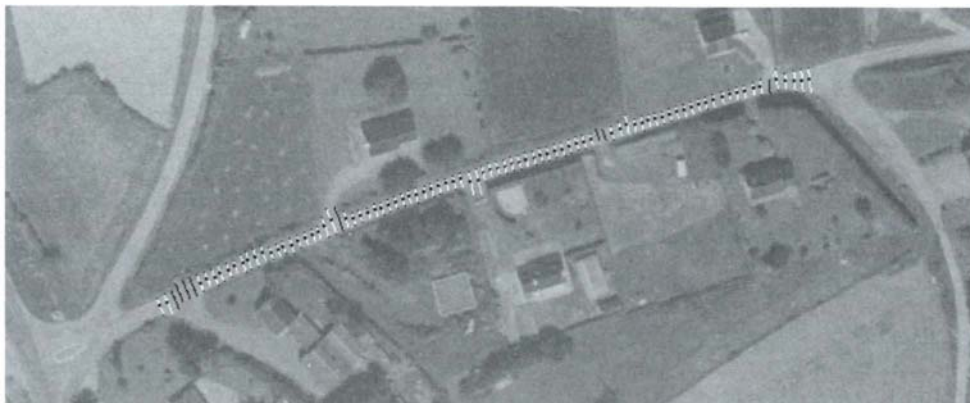


planche B.2.11

Emprise correspondante de la chaussée

Résultats

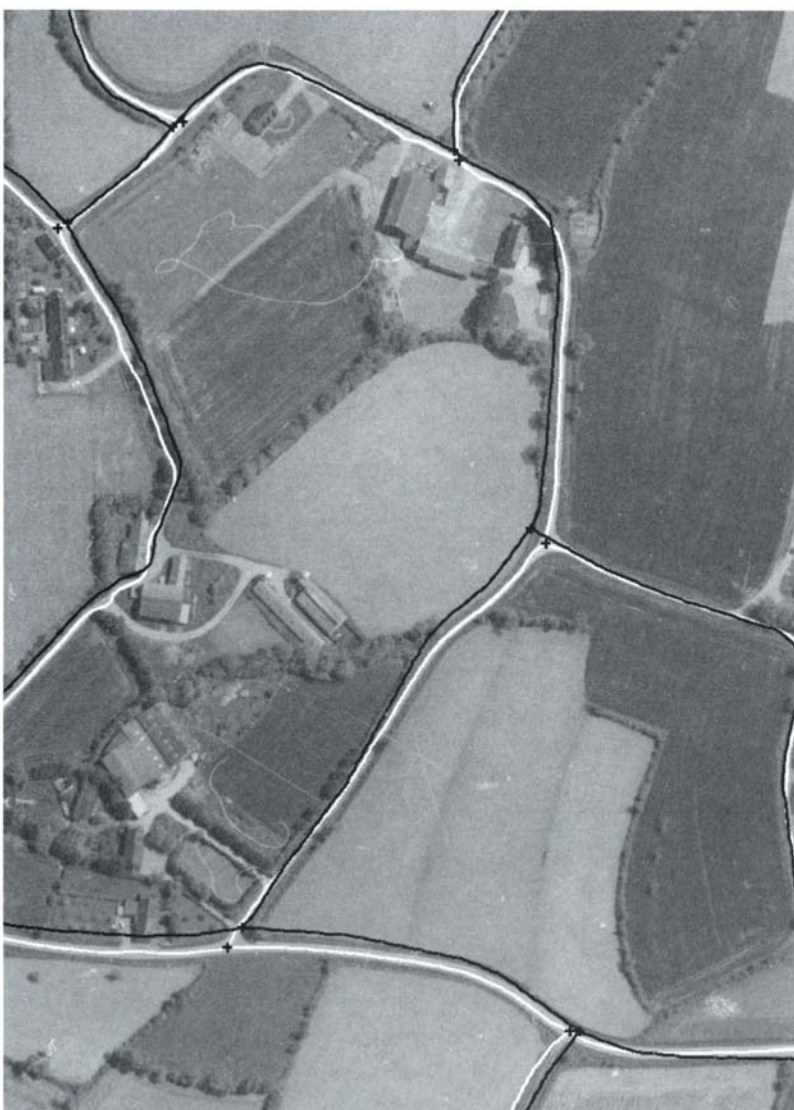


planche B.2.12

Résultat du recalage routier (zone d'Erquy, résolution quarante-cinq cm) : en noir : réseau carte, en blanc : réseau recalé. Le réseau recalé sur une zone englobant cet extrait a été évalué par rapport au réseau routier restitué manuellement pour la BDTOP0. Le taux de carrefours recalés avoisine les 75% avec un écart-type de 2,7 mètres pour un écart-type initial de 7,8 mètres. 73% des arcs ont été recalés avec un écart-type final de 2,2 mètres pour un écart-type initial de 4,4 mètres. Pour plus de détails se référer à [GUÉRIN 96b].

Références

[GUÉRIN 96a] Ph. Guérin : *Apport des cartes topographiques pour l'analyse de scène en imagerie aérienne*, in Revue Internationale de Géomatique, vol. 6, pp. 175-181, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960009/C-ART, novembre 1996.

[GUÉRIN 96b] Ph. Guérin : *Apport des Cartes Topographiques pour l'Analyse de Scène en Imagerie Aérienne : Application à la Détection du Réseau Routier*, thèse de Doctorat de l'Université Paris-7, Denis Diderot IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960011/C-THE, octobre 1996).

[PIERROT 94] M. Pierrot Deseilligny : *Lecture automatique de cartes scannées*, in Bulletin d'information de l'IGN n° 64, Activités Recherche 1994, pp. 31-36, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, 1995.

Publications

[BORDES 96a] G. Bordes, Ph. Guérin, G. Giraudon & H. Maître : *Contribution of External Data to Aerial Image Analysis*, ISPRS 96, Commission IV, Vienne (A), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960017/C-COM, juillet 1996.

B.3 Vers une extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données géographiques

Sylvain Airault et Renaud Ruskoné

Avant-propos

Cet article a été rédigé à partir de la thèse de Renaud Ruskoné, thèse de l'Université de Marne-la-Vallée, soutenue le 4 octobre 1996 [RUSKONÉ 96b].

Introduction

L'IGN a entrepris, depuis plusieurs années, la constitution d'une base de données topographiques, la BDTOPO. Cette base de données reprend le contenu sémantique de la carte traditionnelle au 1 : 25 000 avec des objets saisis en trois dimensions et une précision géométrique de l'ordre du mètre. Elle est saisie par restitution photogrammétrique à partir d'images aériennes panchromatiques dont la résolution est de l'ordre de cinquante centimètres.

Des travaux ont été entrepris au laboratoire MATIS dans le domaine de l'interprétation automatique des images aériennes, aussi bien pour extraire le réseau routier que les bâtiments ou encore le relief, dans le but d'accélérer la saisie initiale de la BDTOPO. Les recherches se heurtent à de multiples difficultés liées à la complexité des scènes naturelles. Si l'exhaustivité d'une interprétation automatique des images aériennes reste pour l'instant un objectif relevant de l'utopie, on peut viser, dans un premier temps, une interprétation partielle mais fiable de certains objets de la scène.

En effet, pour que le résultat d'une interprétation automatique soit exploitable dans des conditions de production, il est nécessaire qu'il soit suffisamment fiable pour ne pas nécessiter des contrôles et des reprises manuelles qui seraient aussi coûteux qu'une saisie manuelle complète.

Le système que nous présentons ici s'applique à l'extraction automatique du réseau routier. Il cherche à répondre à la problématique de l'auto-évaluation des résultats par le système qui les produit, dans le but de filtrer les résultats incertains pour ne conserver que les plus fiables.

L'architecture du système

La démarche générale

Notre système repose sur un cycle enchaînant une phase de génération d'hypothèses et une phase de validation de ces hypothèses. La phase de génération d'hypothèses fait intervenir des connaissances de bas-niveau tandis que la validation met en œuvre des connaissances plus complexes.

En effet, si la plupart des routes (les routes évidentes) peuvent être extraites sur des critères d'assez bas-niveau (radiométrie, texture, forme), de nombreux cas particuliers limitent néanmoins l'identification du réseau routier. Leur traitement ne peut vraisemblablement pas se résoudre sans l'apport de connaissances de haut-niveau (concernant notamment le contexte ou la fonction des objets à identifier).

Cependant, nous voulons insister sur la restriction d'utilisation de procédures interprétatives. En effet, compte-tenu de la complexité des scènes à interpréter, il semble judicieux de faire appel à des connaissances de haut-niveau uniquement pour résoudre des problèmes bien localisés en mettant en place des mécanismes de focalisation.

Cette extraction "à deux niveaux" peut donc être qualifiée d'approche mixte :

- ascendante (guidée par les données) pour l'étape d'extraction de bas-niveau au cours de laquelle on va émettre des hypothèses de route,
- descendante (guidée par le but) pour une étape de validation du réseau extrait qui met en œuvre des critères de plus haut-niveau, pour vérifier les hypothèses de route émises à l'étape précédente. Cette phase de validation est donc focalisée sur l'environnement immédiat de route.

L'enchaînement des différentes étapes du processus

Le processus peut être schématisé par l'enchaînement des étapes suivantes (figure B.3.1) :

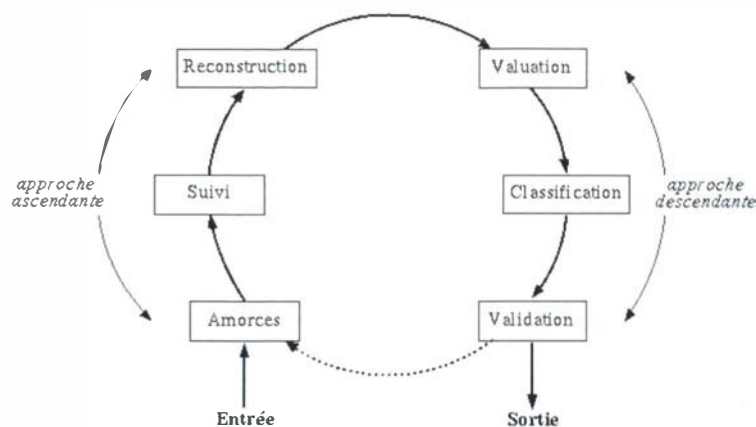


figure B.3.1 : les différentes étapes du processus

Le détail des différentes étapes

La détection d'amorces

Cette étape a pour but de produire des amorces pour initialiser un algorithme de suivi de routes qui va propager les hypothèses de routes à partir de la localisation des amorces, de leur orientation et de leur largeur.

Comme de nombreux auteurs, nous considérons que l'extraction d'amorces de routes peut s'apparenter à l'identification des routes évidentes, celles qui "sautent aux yeux". On exploite pour cela, un modèle de routes relativement simple mais bien adapté à l'identification des routes évidentes : on définit une amorce de route comme une zone allongée, homogène et limitée par deux bords parallèles contrastant fortement avec l'environnement.

La segmentation de l'image

L'image est d'abord segmentée par délimitation des bassins versants dans une image du gradient ("watershed algorithm"), le gradient utilisé étant calculé par un filtrage de Canny-Deriche. Cette méthode de segmentation considère l'image comme un relief topographique où les niveaux de gris sont assimilés aux altitudes. Les lignes de partage des eaux représentent la frontière entre les différentes régions.

La recherche des amorces

Le contour des zones issues de la segmentation est ensuite chaîné puis vectorisé par approximation polygonale. L'appariement des bords parallèles est alors fait segment par segment, ce qui permet de s'affranchir de la notion de zone et donc de mettre en correspondance des régions pas forcément connexes.

Des boîtes (figure B.3.2) traduisant le recouvrement des segments homologues, sont construites avant d'être filtrées sur un critère d'allongement. Les amorces sur lesquelles l'algorithme de suivi va pouvoir s'appuyer sont assimilées aux extrémités de l'axe des boîtes.

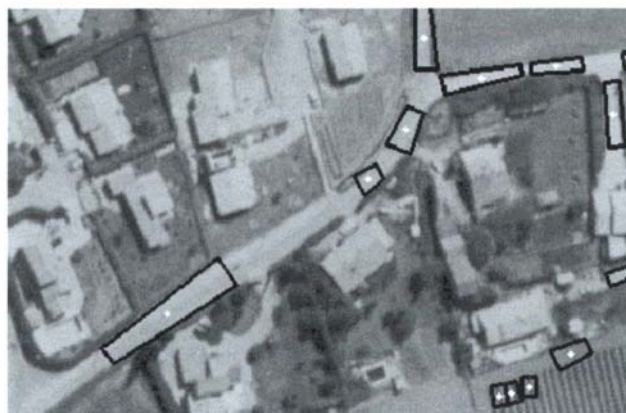


figure B.3.2 : un exemple de résultat de l'extraction d'amorces

Le suivi de routes

Cette phase constitue la principale phase d'extraction de bas niveau. Elle utilise les amorces de routes générées par l'étape précédente. Le but de cette étape est de générer en sortie un réseau plus complet résultant du suivi des hypothèses de route que sont les amorces.

A ce niveau, notre travail s'appuie largement sur les résultats fournis par une approche semi-automatique abordée par ailleurs dans le laboratoire MATIS. Nous avons inclus dans notre architecture l'algorithme de suivi de routes développé par Sylvain Airault [AIRAULT 94a].

L'algorithme de suivi est essentiellement basé sur la connaissance suivant laquelle la chaussée d'une route a une texture homogène limitée par ses deux bords qui correspondent à des discontinuités radiométriques. Si des variances sont calculées sur des voisinages "allongés", la variance dans la direction correspondant à l'orientation de la route est donc minimale.

La façon dont ce critère est implémenté consiste à générer un arbre des chemins possibles de longueur suffisante pour être significative à l'échelle d'une route (cinquante à cent cinquante mètres) et à évaluer ces chemins au moyen d'une fonction de coût sur l'homogénéité de la texture. Chaque chemin est composé de segments de droites choisis localement suivant le critère d'homogénéité. Le fait d'optimiser ensuite ce critère sur un ensemble de segments permet de s'adapter à la forme de la route et de franchir de petits obstacles.

La reconstruction du réseau

Le graphe issu de l'étape précédente présente un certain nombre d'interruptions. Ces interruptions sont dues à la rencontre d'un obstacle qui n'a pu être contourné :

- variation de la radiométrie de la route (signalisation horizontale, changement de la nature du revêtement, ombres,
- masquage de la route (véhicules, arbres, ponts...),
- ambiguïté sur la direction à suivre (carrefours, leurres...).

On va chercher ici à émettre des hypothèses de connexion [RUSKONÉ 94] et de prolongation des tronçons de route précédemment extraits : seuls des critères topologiques et géométriques sont utilisés et aucun retour de bas niveau sur l'image n'est fait au cours de cette étape.

Les hypothèses de connexion

Dans un premier temps, il est nécessaire de reconstruire un graphe aussi complet que possible par génération d'hypothèses de connexions entre les arcs déjà présents. Cette étape repose uniquement sur un certain nombre de connaissances générales quant à la topologie et à la géométrie des réseaux routiers :

- les extrémités libres ou les segments isolés sont rares,
- les tronçons à forte courbure sont minoritaires,
- il est rare de trouver deux itinéraires optimaux de longueur proche pour relier deux points voisins.

A partir des deux premières règles, des hypothèses de connexion sont donc faites par une analyse très locale du voisinage de chaque connexion potentielle sur des critères de proximité et de colinéarité. Pour cela, nous reprenons les principes fondamentaux de la notion de groupement perceptuel qui note l'importance de l'organisation dans l'interprétation : nous avons considéré qu'un segment partiellement interrompu pouvait être complété par simple prolongation ou par mise en correspondance avec le segment le plus proche.

Trois types de relations de connexion peuvent exister :

- soit entre des extrémités libres entre elles,
- soit entre une extrémité libre et l'intersection qu'elle forme avec un autre arc (connexion mixte),
- soit entre des segments dans le prolongement l'un de l'autre.

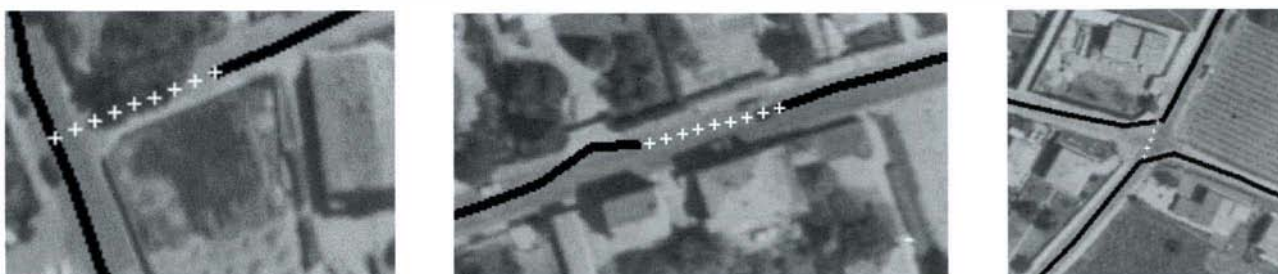


figure B.3.3 : types de connexions possibles

Comme on le voit sur la figure (figure B.3.3), les points "candidats à la connexion" peuvent être, soit des extrémités libres, soit des zones de forte courbure.

En ce qui concerne les modes de raccordement, ils peuvent se faire, soit suivant l'orientation du dernier segment, soit "au plus proche voisin".

Validation de la topologie

La cohérence des hypothèses de connexion est ensuite vérifiée par application de la règle qui veut que deux itinéraires de longueur proche relient rarement deux points voisins.

Le chemin de coût minimal reliant deux points candidats à la connexion est recherché à travers le graphe.

Si on trouve un chemin dont le coût est très voisin du coût de la connexion directe, alors la connexion est considérée comme fautive et les arcs qui composent cette connexion sont effacés du graphe; si par contre, le coût de la connexion directe est très nettement inférieur au coût du chemin, alors la connexion est considérée comme cohérente.

Cette séquence de traitement génération / validation d'hypothèses est itérée jusqu'à stabilisation du processus (c'est-à-dire, jusqu'à ce qu'aucune hypothèse ne puisse plus être générée).

Prolongation

Le but de cette phase de reconstruction n'est pas seulement la connexion de portions de réseau qui se correspondent, mais aussi la prolongation des extrémités libres que l'on n'a pas pu connecter.

En effet, dans ce cas, il est important de passer sur l'obstacle ayant généré un arrêt du suivi pour que les étapes ultérieures de validation puissent interpréter le segment recouvrant l'obstacle.

La prolongation des extrémités libres est faite en ajoutant un segment de longueur constante à toutes les extrémités libres n'intervenant dans aucune connexion, et ce, suivant l'orientation du dernier segment extrait.

La valuation du réseau

On aborde ici la phase "descendante" de notre système au cours de laquelle chacune des hypothèses de route émises doit être confirmée ou mise en doute.

Pour cela, on se propose dans un premier temps, de valuer chaque portion du réseau avec un vecteur de mesure qui va nous permettre de faire la transition entre la représentation numérique et la représentation symbolique des données en déduisant du vecteur de mesures une hypothèse quant à la nature d'une portion du réseau.

A ce niveau, la structure de graphe que nous utilisons pour modéliser les hypothèses de route va donc être modifiée de deux façons :

- fractionnement par le découpage des tronçons de route en petits arcs de longueur constante,
- calcul d'un vecteur de mesures lié à chaque arc,
- calcul d'un vecteur d'hypothèses sur la nature de chaque arc (en fait : sur la nature des objets image traversés par les arcs).

Modélisation des connaissances

Dans un premier temps, nous avons recensé les objets les plus fréquemment rencontrés dans les images traitées (pixels au sol de trente à cent centimètres). Parmi ces objets, nous avons conservé :

- ceux qui peuvent produire des modifications des caractéristiques de la route (modification de la radiométrie au voisinage d'arbres ou d'ombres, de la courbure près des carrefours...),
- ceux qui ont des caractéristiques proches de celles de la route.

Pour déterminer les types d'objets à intégrer dans notre processus d'interprétation, nous nous basons sur une étude statistique des causes d'arrêt de l'algorithme de suivi de routes.

Ces arrêts sont causés le plus souvent par des carrefours ou des rangées d'arbres (figure B.3.4).

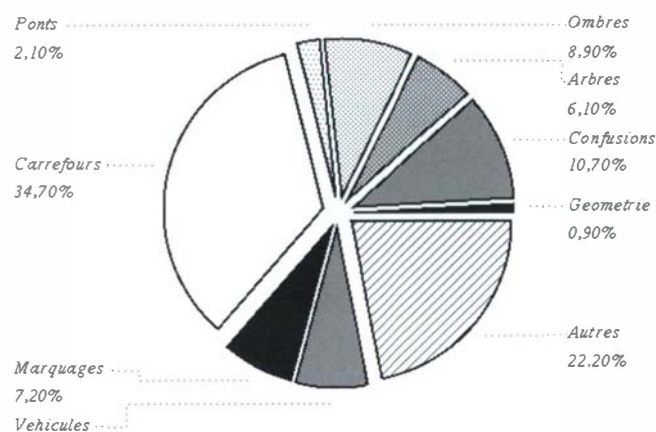


figure B.3.4 : causes d'arrêt du suivi de routes

Il faut toutefois remarquer, que l'analyse des causes d'arrêt est relativement complexe, étant donné que l'obstacle qui est à la source de l'erreur n'est pas toujours celui qui provoque l'arrêt.

Par exemple, si une ombre masque partiellement la route, le suivi va éviter cette ombre en s'égarant dans le champ voisin

La classe "autres" regroupe des causes d'arrêt rares (parking, impasse...) ou multi-thématiques. La classe "confusion" fait référence aux endroits où la radiométrie de la route devient proche de celle de son environnement. Cette classe apparaît comme la seule variant fortement en fonction de l'image.

En revanche, les autres causes d'arrêt sont stables.

L'analyse des causes d'arrêts physiques permet de déterminer cinq thèmes principaux : les routes, les carrefours, les ombres, les champs et les arbres :

- les routes sont des zones allongées avec une courbure faible, leur radiométrie est plutôt faible et homogène,
- les carrefours représentent l'intersection de plus de deux portions de route, leurs branches forment entre elles des angles souvent importants, leurs caractéristiques sont proches de celles de la route,
- les ombres sont des zones allongées, avec une courbure faible et généralement de petite taille, leur radiométrie est très faible et homogène, ces zones sont attenantes à des objets élevés (bâtimens, arbres...),
- les champs peuvent être caractérisés par la variabilité de leur radiométrie, de leur texture, par leur taille et leur forme polygonale,
- les arbres ont une radiométrie faible et hétérogène, ils engendrent généralement une ombre, leur forme peut être soit circulaire (lorsqu'ils sont isolés), soit allongée (quand ils forment des rangées), soit quelconque (forêts), contrairement aux objets précédents, leur élévation est supérieure au niveau du sol.

Choix des mesures

Nous avons également dressé une liste de caractéristiques supposées discriminantes :

- caractéristiques géométriques (surface, largeur, élongation, courbure...),
- caractéristiques radiométriques (moyenne, variance...) [AIRAULT 94b],
- caractéristiques altimétriques.

La classification

Après valuation, le réseau se compose d'arcs portant une liste d'attributs. L'étape de classification va consister à interpréter ces mesures en attribuant à chacun de ces arcs une probabilité d'appartenance à une des différentes classes d'objets possibles. On remplit donc à ce niveau l'attribut Nature lié à chaque arc.

Nous avons choisi d'utiliser une méthode de classification dérivée des classifications aux plus proches voisins (k- nearest neighbors ou k-NN).

L'objectif de toutes les méthodes de classification est de regrouper les points d'un ensemble présentant le plus de caractéristiques communes.

Dans les classifications aux plus proches voisins, les plus proches voisins d'un point (plus proches en terme de distance euclidienne, dans notre implémentation) permettent de définir une classe probable qui est attribuée au point considéré.

Au cours d'une phase d'apprentissage, cinq ensembles de segments correspondant aux cinq classes d'objets considérées sont classés de façon itérative.

Après chaque itération, la probabilité d'appartenance de chaque prototype à sa classe d'origine est utilisée pour changer son poids.

Si un point est parfaitement identifié, son poids est renforcé. Si, par contre, le point est éloigné du centre de la classe, il reçoit un poids plus faible dans la mesure où il n'est pas représentatif de la classe.

Résultats

Sur la matrice de confusion suivante (tableau B.3.1), on constate l'assez bonne fiabilité des hypothèses qui sont faites mais aussi la nécessité de vérifier ces hypothèses de façon plus poussée, notamment pour les classes où la confusion est forte.

Ainsi la confusion entre les classes route et carrefour est importante : un arc étiqueté comme route a près de 74% de chances d'être effectivement une route, mais 26% de chance d'être un carrefour.

Lorsque l'arc est identifié comme un carrefour, le diagnostic est encore plus ambigu, puisqu'un tel arc a 47% de chance d'être en fait une route. Il y a également une confusion entre les classes arbre et ombre.

tableau B.3.1 : résultat d'une classification - matrice de confusion
(pourcentage des arcs classés Y étant de nature X dans la réalité)

classés Y	sont dans la réalité : X					TOTAL
	Route	Carrefour	Ombre	Champ	Arbre	
Route	73,7	25,9	0,1	0,3	0,0	100
Carrefour	46,7	53,3	0,0	0,0	0,0	100
Ombre	0,0	1,6	98,4	0,0	0,0	100
Champ	3,6	0,9	0,0	84,4	11,1	100
Arbre	0,0	0,0	25,9	3,8	70,3	100
Ambigu	21,4	9,5	7,3	18,6	41,2	100

En sommant le nombre de segments correctement classés (somme diagonale), on peut estimer que 70,4% de ces arcs sont identifiés sans erreur (c'est-à-dire que le taux d'erreur vaut 29,6%).

La validation

La phase de validation a pour but de vérifier les hypothèses sur la nature des objets issue de la phase précédente. On fait pour cela appel à des modules dédiés à la reconnaissance de chacun des objets modélisés.

Ces modules doivent être appelés suivant une stratégie de déclenchement et leurs réponses doivent être exploitées suivant une stratégie de résolution.

Les objets que manipule à ce niveau notre système possèdent quatre attributs :

- un attribut de forme (compacte, allongée ou étendue),
- un vecteur de mesures (issues de la phase de valuation),
- un attribut de nature (initialisé au niveau de la phase de valuation),
- une fiabilité (confiance à accorder au diagnostic de leur nature).

Les modules développés

Des modules spécialisés dans la détection des carrefours [RUSKONÉ 96c], des ombres et des arbres ont été développés dans le cadre de notre approche.

Leur description figure dans la thèse dont cet article n'est qu'un résumé [RUSKONÉ 96b].

Stratégie de déclenchement

On peut envisager de différentes manières le choix et le séquençage de l'intervention des modules spécialisés : plusieurs solutions existent entre les deux extrêmes qui consisteraient, soit à vérifier uniquement l'hypothèse la plus probable (stratégie déterministe), soit à vérifier toutes les hypothèses (stratégie exhaustive). Il n'existe pas de solution *a priori*.

Dans la mesure où les hypothèses sont plus ou moins fiables, on peut considérer qu'au-delà d'un seuil, certaines peuvent être négligées.

Nous avons donc choisi de déclencher la validation de toutes les hypothèses "vraisemblables". De plus, quand l'arc que l'on étudie a été classé comme "ambigu", tous les modules sont déclenchés.

Stratégie de résolution

Il est ensuite nécessaire, une fois connue la nature de chacun des petits arcs, de faire une analyse moins locale en intégrant des relations de compatibilité entre objets.

Dans une optique de recherche de fiabilité, il serait possible de ne conserver, à l'issue de la validation "locale" des arcs, que ceux qui sont reconnus comme étant des routes.

Cependant, de nombreux "obstacles", comme par exemple des arbres isolés, même s'ils sont correctement reconnus, ne doivent pas remettre en cause la présence possible d'une route.

L'élimination systématique de tous les arcs non reconnus comme routes risquerait de laisser comme résultat final de l'interprétation un réseau trop morcelé.

C'est la mise en correspondance de l'attribut de forme et de l'attribut de nature qui permet d'infirmer ou de confirmer l'hypothèse d'une route.

Nous distinguons donc trois types de formes qui vont chacune entretenir des relations de compatibilité avec chacune des natures d'objets modélisées :

- une forme compacte de petite taille (comparable à l'emprise d'un arbre isolé),
- une forme allongée,
- une forme étendue assimilable aux objets surfaciques de taille importante (tels que les forêts ou les champs).

Des relations de colinéarité existent entre les objets de forme allongée. On peut alors considérer que de tels objets renforcent une hypothèse de route. C'est le cas pour les arbres lorsqu'ils sont organisés en rangées ou les ombres allongées des bâtiments.

Par contre, les objets étendus ne peuvent en aucun cas masquer une route (sauf peut être pour les forêts) et, en tous cas, la validation de la route à travers ces zones est très hasardeuse.

L'identification de tels obstacles permet donc d'infirmer la présence d'une route. On considérera donc qu'un arc traversant une zone d'arbres organisés en forêt ou de champs a peu de chances d'être une route.

En ce qui concerne les objets compacts, leur identification permet uniquement de ne pas infirmer une hypothèse de route.

On considère en fait que leur taille est suffisamment petite pour que la perturbation qu'ils engendrent soit locale et qu'on puisse retrouver la route à proximité.

Évaluation des résultats

Cette partie présente les résultats d'une évaluation de la qualité du réseau routier extrait avec ce système. Cette évaluation n'est pas complète dans la mesure où elle correspond au traitement d'un seul site relativement simple du point de vue de l'interprétation.

Il s'agit d'une zone rurale en Bretagne (autour d'Erquy), où les routes sont souvent bien marquées et où les obstacles sont souvent "ponctuels".

Cependant, il est intéressant d'évaluer, indépendamment de la complexité du site, l'évolution de la qualité du réseau extrait au cours des différentes étapes du traitement.

L'évaluation de l'influence de chacune des étapes sur le résultat final se justifie notamment par le fait que le meilleur résultat n'est pas forcément la combinaison des meilleurs résultats intermédiaires.

On peut très bien imaginer qu'une étape d'extraction d'amorces très peu contrainte aboutisse en fin d'extraction à un résultat meilleur que celui qu'aurait donné un amorçage générant moins d'amorces (mais toutes fiables).

On va donc chercher à évaluer la qualité de chacun des résultats intermédiaires, à la fois en termes de fiabilité (en évaluant le taux de fausses détections) et en termes de précision géométrique.

Cette évaluation est réalisée en prenant comme données de référence une saisie BDTOPO traditionnelle.

On a introduit ici deux itérations dans le processus :

- une première itération où l'on a émis des hypothèses de prolongation sur certains tronçons puis validé ces hypothèses par la présence d'un obstacle ponctuel
- une seconde itération où l'on a relancé le suivi de route à partir de ces nouvelles "amorces".

Évaluation de la fiabilité du système

On va chercher à mesurer ici à la fois le taux de sous-détection, le taux de sur-détection et le taux de fausses détections.

On définit ces mesures à partir d'un appariement entre le graphe résultat et le graphe de référence de la façon suivante :

- la mesure de sur-détection traduit le fait que plusieurs objets du graphe résultat soient appariables à un même objet du graphe référence. Il peut s'agir de la restitution d'un bas-côté bordant la route ou encore de la restitution d'une route à chaussées multiples (n'ayant évidemment pas été généralisées à un tracé unique). La mesure de sous-détection traduit le fait qu'un objet du graphe référence n'a pas d'homologue dans le graphe résultat. Cette indicateur mesure l'exhaustivité de notre détection,

- la mesure de fausse détection est définie comme la proportion d'objets du graphe résultat non appariables avec le graphe référence. Les "objets" utilisés pour l'appariement sont des "tronçons de routes", c'est-à-dire l'ensemble des segments joignant deux nœuds du graphe, les nœuds pouvant être soit des carrefours, soit des extrémités libres.

tableau B.3.2 : évaluation de la fiabilité du système (en pourcentages d'objets)

	sur-détection	sous-détection	fausses détections
extraction des amorces	24,8	54,6	66,1
suivi de routes	12,2	55,0	88,9
reconstruction	17,8	39,4	49,7
validation (1ère itération)	6,5	31,8	19,5
validation (2ème itération)	6,5	29,0	19,8

On peut faire deux types d'analyse à partir de ces résultats (tableau B.3.2) : d'une part une analyse de la qualité des résultats finaux et, d'autre part, une analyse de l'évolution des résultats au cours des différentes phases :

— les résultats finaux sont relativement bons puisque environ 70% du réseau routier de référence a été détecté avec un taux d'erreur de l'ordre de 25%. Cependant, il est nécessaire de relativiser ce bon résultat en répétant qu'il provient d'une image assez simple à traiter,

— l'évolution des résultats au cours des différentes phases est intéressante dans la mesure où elle montre la pertinence de chacune des étapes puisque les indicateurs évoluent tous dans le "bon" sens au cours du processus en montrant une diminution sensible des erreurs.

Nous constatons que certains arcs détectés automatiquement sont effectivement des routes mais qui ne figurent pas dans la référence (cas (1), (2), (3), (6) notamment dans la figure B.3.5)).

D'autres correspondent véritablement à des erreurs de détection (cas (4) et (5)). De façon plus générale, on peut voir que les deux graphes ne sont pas toujours parfaitement superposés.

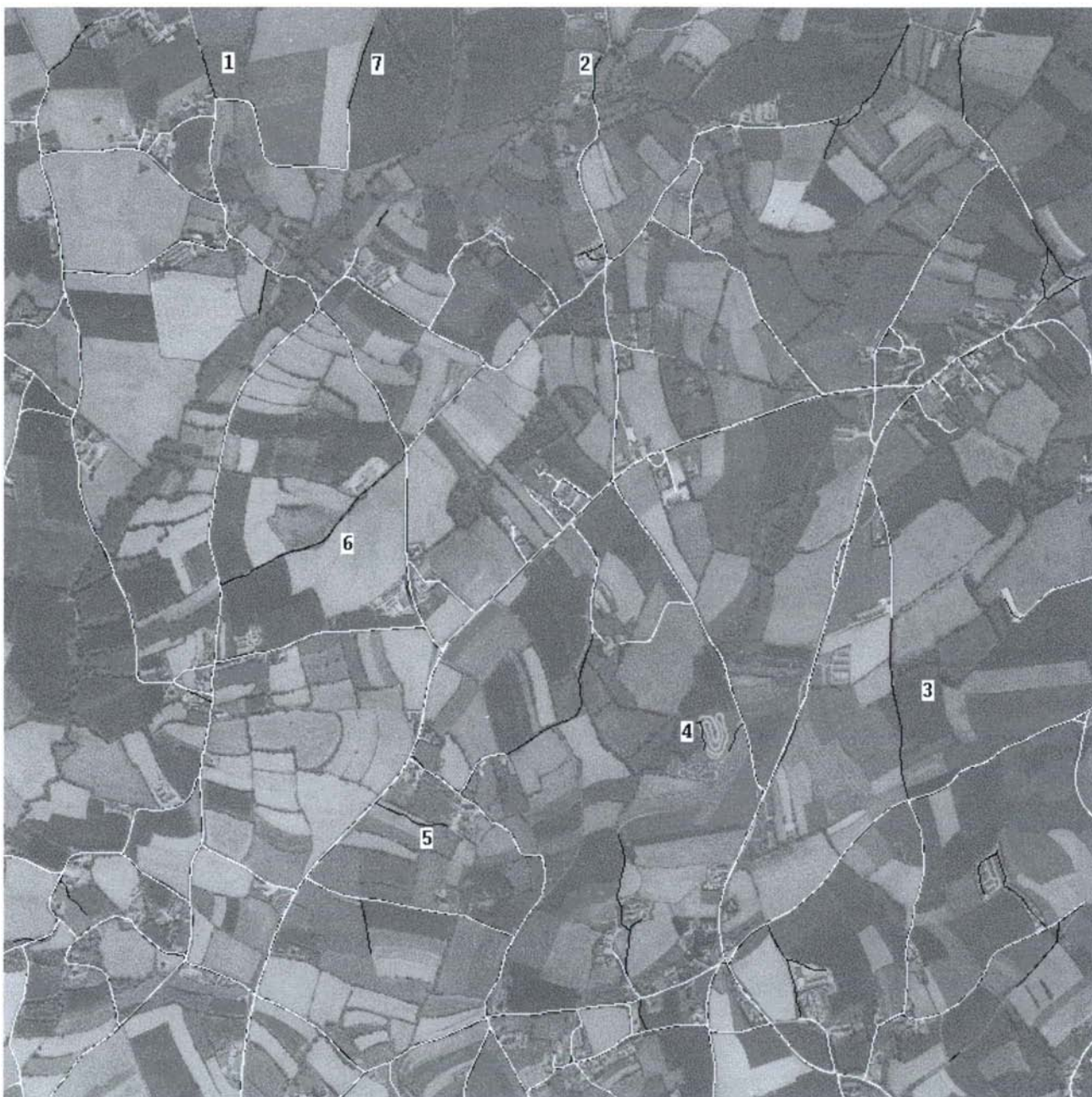


figure B.3.5 : superposition référence BDTOPO/extraction automatique

Ces erreurs de superposition sont également visibles sur l'image suivante qui inverse les deux graphes (figure B.3.6).

Les arcs de couleur visualisent donc maintenant les sous-détections.

On constate plusieurs types d'erreurs à ce niveau; les oublis simples (cas (1) et (2)), les arcs difficilement visibles sur l'image mais que le restituteur a probablement identifié à l'aide d'une source de données annexe (cas (3), (4) ou (5)).

Ce dernier cas montre, d'une part, les limites de l'interprétation automatique et, d'autre part, la nécessité d'une source de données complémentaire.



figure B.3.6 : superposition extraction automatique/référence BDTPO

Évaluation de la qualité géométrique des routes extraites

La qualité géométrique du réseau extrait est évaluée en effectuant un découpage du graphe résultat en segments de longueur constante et en appariant chaque point ainsi créé avec son plus proche voisin sur le graphe de référence [AIRAULT 95].

tableau B.3.3 : évaluation de la précision géométrique du réseau extrait (en mètres)

	m xy	emq xy	écart-type xy
extraction des amorces	1,38	1,62	1,60
suivi de routes	0,87	1,13	1,07
reconstruction	0,91	1,18	1,13
validation (1ère itération)	0,81	1,05	0,98
validation (2ème itération)	1,06	1,05	0,99

On constate ici encore (tableau B.3.3), la très bonne qualité du résultat final mais avec toujours la même réserve sur la mauvaise représentativité du site test, en termes de difficulté d'extraction. En effet, les routes de cette zone ont des bords très contrastés qui permettent un recalage géométrique précis du tracé.

Conclusion

Malgré un certain nombre d'améliorations qui doivent encore lui être apportées, ce système permet d'extraire avec une bonne fiabilité une part importante du réseau routier sur des scènes relativement simples. De plus, nos évaluations confirment l'efficacité de la modélisation et de l'exploitation de connaissances liées à d'autres objets que les routes pour interpréter avec succès les scènes routières.

Cependant, si ce système se comporte assez bien pour reconnaître ponctuellement des obstacles de nature donnée, il atteint rapidement ses limites sur des scènes plus complexes dans lesquelles les obstacles ne sont pas toujours de "nature" unique mais composés eux-mêmes de nombreux objets élémentaires : véhicules, marquage au sol, ombres Il serait pour cela nécessaire d'aller beaucoup plus loin en termes de modélisation en prenant en compte non seulement les interactions entre les routes et les autres objets mais également les interactions entre les autres objets entre eux. Il faudrait pour cela remettre en cause l'indépendance de nos modules spécialisés et permettre une communication entre ces différents modules.

Publications

[AIRAULT 94a] S. Airault & O. Jamet : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aériennes*, in Actes du congrès RFIA, Paris (F), vol. 1, pp. 519-531, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940001/C-COM, janvier 1994.

[AIRAULT 94b] S. Airault, R. Ruskoné & O. Jamet : *Road detection from aerial images : a cooperation between local and global methods*, Image and Signal Processing for Remote Sensing, Satellite Remote Sensing I, SPIE, volume 2315, pp. 508-518, Rome (I), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940019/C-COM, septembre 1994.

[AIRAULT 95] S. Airault & O. Jamet : *Évaluation of the operability of a semi-automatic road network capture process*, Digital Photogrammetry and Remote Sensing'95, SPIE, volume 2646, pp. 180-191, St-Petersburg, (Russie), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950003/C-COM, juin 1995.

[RUSKONÉ 94] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road network interpretation : a topological hypothesis driven system*, ISPRS, commission III symposium, pp. 711-717, Munich (D), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940046/C-COM, septembre 1994.

[RUSKONÉ 95] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road network extraction by local context interpretation*, Image and Signal Processing for Remote Sensing, Satellite Remote Sensing II, SPIE, volume 2315, pp. 508-518, Paris (F), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950031/C-COM, septembre 1995.

[RUSKONÉ 96a] R. Ruskoné, L. Guigues, S. Airault & O. Jamet : *Vehicle detection on aerial images : a structural approach*, ICPR proceedings, Vienne (A), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960014/C-COM, août 1996.

[RUSKONÉ 96b] R. Ruskoné : *Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données géographiques*, thèse de l'Université de Marne-la-Vallée, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960011/C-THE, octobre 1996.

[RUSKONÉ 96c] R. Ruskoné & S. Airault : *Vers une interprétation automatique du réseau routier sur images aériennes : détection et analyse des carrefours*, in Revue Internationale de Géomatique, volume 6, n° 2-3, Hermès, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960015/C-ART, novembre 1996.

B.4 Séparation des zones naturelles et construites sur images aériennes

Olivier Dissard

Introduction : contexte de l'étude et objectifs

Ce travail s'inscrit dans un processus d'interprétation globale de scène. Nous nous plaçons dans une situation où nous possédons des algorithmes destinés à reconstruire des objets cartographiques à partir de primitives images (voir par exemple, "interprétation et restitution automatiques des bâtiments sur images aériennes" (Bulletin d'Information de l'IGN n° 64, Activité Recherche 1994) et cherchons à les utiliser aux endroits où se situent ces objets et non sur l'ensemble de l'image. En effet, une utilisation "en aveugle" de ces algorithmes est source de calculs longs, d'explosion combinatoire et de nombreuses fausses alertes, ce qui nous oblige en général à imposer des contraintes très strictes aux modèles d'objets recherchés. Par exemple, nous imposons des contraintes très strictes d'angle droit aux bâtiments composés de rectangles, détectés par l'algorithme cité précédemment, nous réduisons ainsi le nombre de possibilités, mais augmentons d'autant les risques de "passer à côté" d'un bâtiment mal contrasté....

Une première étape de focalisation est donc un atout majeur pour interpréter une scène, puisque d'une part elle permet de choisir l'algorithme de reconstruction correspondant à l'objet discerné, d'autre part elle permet de s'affranchir de contraintes strictes sur les paramètres, le nombre de primitives étant réduit dans chaque périmètre d'étude.

Cette étape de focalisation se décompose en deux parties : détection de la présence d'un objet puis d'un périmètre d'étude pour l'algorithme. Elle peut s'affiner par itérations successives grâce à l'introduction de nouveaux critères (on peut aussi le voir comme une modélisation de plus en plus fine des objets à focaliser). Ainsi les zones de sursol détectées par analyse d'un modèle numérique d'élévation (MNE) (voir "Appariement stéréoscopique d'images aériennes et extraction du sursol en milieu péri-urbain", Bulletin d'Information de l'IGN n° 65, pages 14-17, Activité Recherche 1995) peuvent être étiquetées plus précisément - voire re-segmentées - en zones bâties et zones de végétation.

Le travail que nous présentons ici est destiné à fournir à l'étape de focalisation, une indication de la présence de structures linéaires dans le voisinage de tout point de l'image. On imagine tout de suite l'utilité d'un tel critère : détecter la présence d'objets "polygonaux", puis utiliser des algorithmes basés sur des modèles géométriques (groupement perceptuel, par exemple). Une vision simpliste des images aériennes serait d'attribuer à tout ce qui contient des structures linéaires une main humaine, puis d'attribuer à ce qui n'est pas structuré, une essence naturelle. Nous verrons que cette vision contient une part intéressante de vérité mais qu'elle se heurte aux notions de pixels et de résolution. Nous verrons aussi poindre une troisième classe : les zones homogènes.

Une caractérisation locale

La recherche qui est exposée ici a consisté à mettre au point un indicateur pertinent de présence de structures linéaires. Parce qu'il doit être utilisé à toutes les étapes de la focalisation, c'est à dire à la fois comme mesure sur l'image pour un processus de croissance de région et comme attribut sur une carte de régions, nous cherchons un indicateur local, c'est à dire une valeur pour chaque pixel de l'image.

La figure B.4.1 représente deux situations différentes : centre-ville et forêt. Attardons nous sur les directions des contours des formes de l'image, en fait de façon plus pratique, sur les directions des gradients des niveaux de gris dont le module est élevé (figure B.4.2). Nous voyons que les zones à base de structures localement linéaires sont représentées par une "couleur dominante", une direction dominante, tandis que les zones dépourvues de telles structures n'en possèdent pas. Ce sont donc ces directions de gradient que nous allons exploiter.

Pour cela, il nous faut définir en premier lieu, comment mesurer au voisinage d'un point un "degré" de structuration linéaire, et puis bien sûr, ce qu'est un voisinage de point.

Mesure d'une direction principale

Disposant d'un ensemble de directions de gradient, la mesure de la présence d'une direction principale est effectuée par l'indicateur entropique:

$$S = - \sum_{d \in \{directions\}} (p(d) * \ln(p(d)))$$

où $p(d)$ est la probabilité de présence de la direction d dans l'ensemble des directions de gradients. Lorsqu'une unique direction est présente dans cet ensemble, l'entropie est nulle; par contre une équiprobabilité de toutes les directions est synonyme d'entropie maximale.

En fait l'entropie n'est pas en théorie le meilleur indicateur, car il ne tient pas compte des "regroupements" de directions voisines, chaque direction est indépendante des autres pour ce calcul. Par exemple, supposons que l'on a huit directions possibles de $[0, P/8]$ à $[7*P/8, P]$ et les deux distributions de probabilité: $(0, 0, 0, 1/3, 1/3, 1/3, 0, 0)$ (cas A) et $(0, 1/3, 0, 0, 1/3, 0, 1/3, 0)$ (cas B), alors S (cas A) = S (cas B).

Toutefois dans la réalité les pics de directions principales ne sont pas marqués, les directions immédiatement voisines sont représentées et la présence de plusieurs directions marquées ne donnera jamais une distribution de probabilité du type (cas B) mais plutôt une distribution "aplatie" d'entropie élevée. Dans les faits, cet indicateur se révèle efficace.

Un avantage non négligeable de l'entropie pour caractériser des formes dans un voisinage d'un point est qu'elle opère sur un ensemble à une dimension (les intervalles de direction) et non sur des matrices comme c'est le cas par exemple pour les indicateurs qui opèrent sur des matrices de cooccurrence. Dès lors, la population minimale de points qui rend cet indicateur significatif reste raisonnable à l'échelle de l'image, ce que nous allons voir dans le paragraphe suivant.



figure B.4.1 : deux images en niveau de gris, Valreas et Erquy, (résolution 45 centimètres)

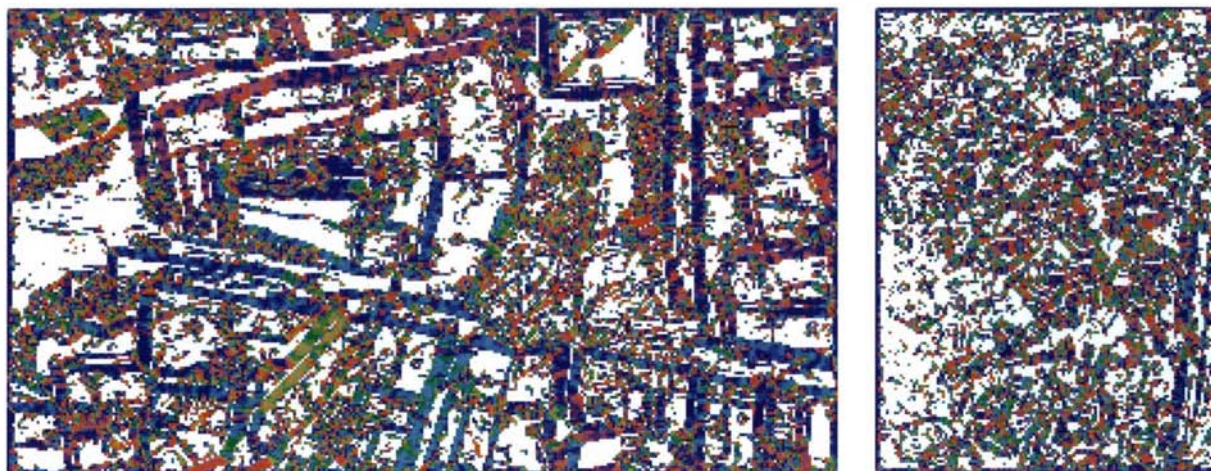


figure B.4.2 : direction des gradients de niveau de gris dont le module est supérieur à dix.

La table de couleur bleu -> vert -> rouge -> bleu est circulaire et représente les angles modulo $\pi/2$ en seize intervalles.

Voisinage étudié et mise en application

Afin de ne pas multiplier les directions principales dans le cas de structures rectangulaires, les directions sont exprimées modulo $\pi/2$. Le premier cadran du cercle trigonométrique est lui même divisé en seize intervalles dans lesquels nous rangeons les directions de gradient.

Dans la figure B.4.2, ces intervalles sont représentés par des couleurs. De plus, nous ne considérons pas les gradients en tout point de l'image: seuls ceux dont le module est suffisamment élevé sont pris en compte.

Les voisinages étudiés sont des fenêtres centrées de rayon huit à onze pixels (dix-sept à vingt-trois pixels de diamètre), en fonction de la résolution de l'image, ce qui correspond à un disque de huit à dix mètres de diamètre environ et limite l'étude à un contexte peu éloigné.

Cela procure généralement suffisamment de points de gradient élevé pour l'étude entropique.

Dans le cas contraire, nous considérons que le point se situe dans une région homogène, que l'on peut voir comme une classe créée spécialement pour ranger les points non classés.

Un seuil minimum de quatre-vingt points classés dans les seize directions est fixé pour le calcul de l'entropie.

Résultats

Appliqué sur les deux imagerie thématiques de la figure B.4.1 et sur l'image de la figure B.4.3, l'indicateur entropique nous donne les histogrammes de la figure B.4.4 d'allures semblables.

Cependant lorsque nous masquons les images par les pixels d'entropie élevée/basse, nous obtenons bien les régions structurées/non structurées.



figure B.4.3 : site de la région de Romainville, résolution de quarante centimètres



figure B.4.4 : histogrammes de l'indicateur entropique sur les images de la figure B.4.1 et sur l'image de la figure B.4.3. On n'y voit pas apparaître les deux classes recherchées, néanmoins la sélection des pixels de l'image correspondant aux entropies basses fait apparaître les zones structurées.

Afin de mieux distinguer ces deux classes, une série de plusieurs millions de fenêtres de gradients aléatoires a été calculée et nous en avons tiré un histogramme des entropies. Cet histogramme nous permet de définir dans l'espace des entropies, des intervalles d'équiprobabilité, dans lesquels nous exprimons finalement notre mesure de structuration.

En d'autres termes, nous déformons l'espace de sorte que l'histogramme des millions de fenêtres aléatoires soit plat. Si les deux classes que nous espérons trouver existent, elles devraient donner deux modes bien distincts dans cet espace déformé. Les nouveaux histogrammes se trouvent en figure B.4.5, nous y distinguons clairement les deux classes (structuré / non structuré). En figure B.4.6, nous avons partitionné l'image aérienne de la figure B.4.3 en pixels de voisinage structuré ou homogène (peu d'objets naturels sont homogènes) : figure B.4.6a, et en pixels de voisinage non structuré: figure B.4.6b.



figure B.4.5 : nouveaux histogrammes calculés sur des valeurs réévaluées de l'entropie en fonction d'un histogramme calculé sur quelques millions de fenêtres aléatoires. On y voit apparaître les deux classes recherchées; un exemple de sélection des pixels de ces deux classes est donné en figure B.4.6a et B.4.6b. Les histogrammes sont volontairement tronqués au niveau des valeurs maximales pour une question de visibilité

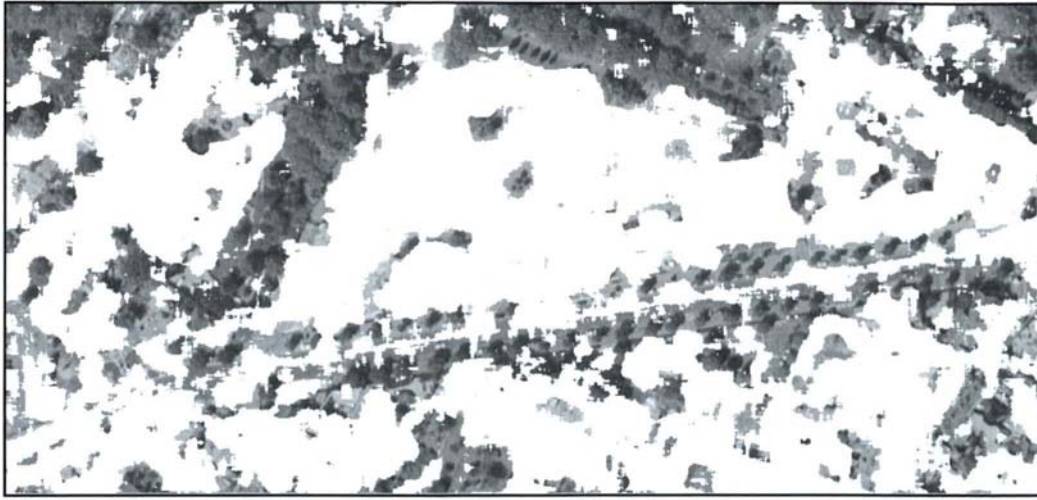


figure B.4.6a

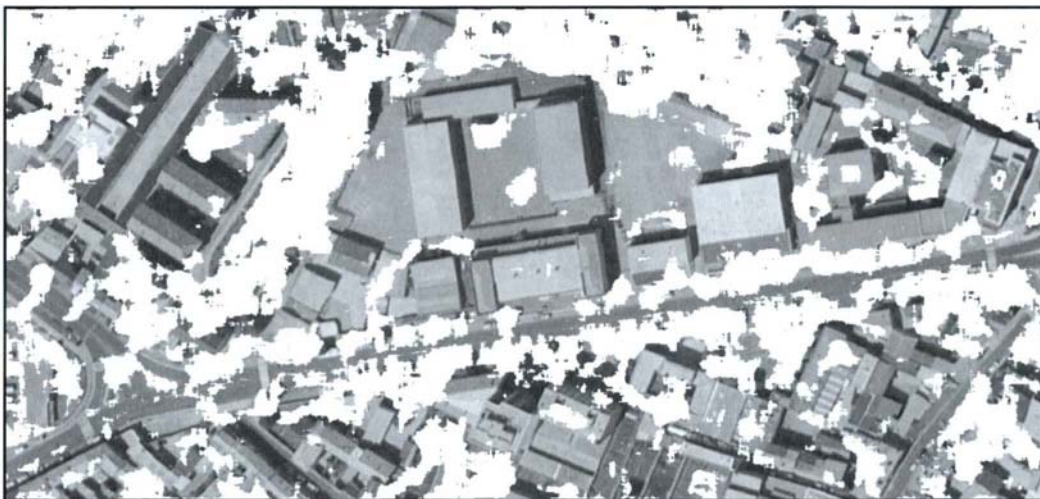


figure B.4.6b

figure B.4.6 (a et b) : pour ces deux images, nous avons sélectionné les pixels d'entropie élevée (6a) et les pixels d'entropie basse ou classés homogènes (6b). Cette séparation permet d'apprécier l'opportunité de l'indicateur et pourrait correspondre à une séparation bâti/végétation, moyennant les réserves indiquées dans le texte.

Cet indicateur sépare bien les zones construites ou modelées par l'homme des zones naturelles avec toutefois quelques nuances: les détails ponctuels à cette résolution (quarante centimètres) sont sources de gradients multidirectionnels donc d'entropie élevée. C'est le cas des superstructures sur les toits.

Par ailleurs une trop grande densité de détails linéaires de directions souvent différentes est source d'entropie élevée; c'est le cas des zones d'urbanisation dense. Le choix de la résolution est important, un détail ponctuel devient surfacique à une meilleure résolution; de même un imbroglio de structures linéaires peut s'éclaircir. Par contre, une meilleure résolution induit l'apparition d'autres détails ponctuels et des surfaces homogènes plus grandes.

Applications

Deux applications ont déjà été développées, et ce à deux niveaux différents de la focalisation :

- détection des forêts sur les images aériennes de paysages ruraux,
- caractérisation de zones de sursol.

Détection des arbres et forêts sur images aériennes de paysages ruraux

Nous exploitons ici le fait que sur de tels paysages, et à la résolution classique de cinquante centimètres environ, l'indicateur entropique se comporte comme un indicateur de zone naturelle, de zone construite ou de zone homogène, les artefacts qui mettent cette classification sommaire en échec sont des objets présents surtout en urbain dense et donc peu en milieu rural. Une première étape de segmentation de l'image en fonction de l'indicateur entropique est donc

opérée, nous nous focalisons par la suite sur les pixels d'entropie élevée et, comme nous cherchons des arbres, sur les pixels d'ombre (le seuillage des ombres y est sommaire). Pour cela, nous faisons circuler un disque de la taille d'un arbre moyen pour la résolution de l'image, y regardons si les pixels sont en (grande) majorité à entropie élevée et s'il existe des pixels d'ombre dans la direction opposée au soleil. Cette étape s'effectue sur des images sous-échantillonnées cinq fois et est presque immédiate. Nous pouvons par la suite ne conserver que les régions d'une surface minimum donnée. Deux exemples de résultat sont donnés en figure B.4.7. De manière générale, l'algorithme se comporte très bien sur les arbres, lorsque ceux-ci possèdent un feuillage bien visible (c'est-à-dire en été ou en automne).

En ce qui concerne les fausses détections, ce processus détecte certaines surfaces des champs sombres et tourmentés, fraîchement retournés par exemple. Les pavillons en bordure d'image et à pignon important sont aussi parfois détectés : il n'y a pas de direction principale donc une entropie élevée, mais par contre il y a des ombres.

Caractérisation des zones de sursol

Pour cette application, nous disposons des zones de sursol détectées par l'algorithme cité dans [BALLARD 96].

Nous rappelons qu'une zone de sursol correspond à un ou plusieurs objets d'à peu près la même élévation, et adjacents. L'algorithme sépare deux zones adjacentes mais d'élévations différentes.

Cette première étape de focalisation effectuée, les questions que nous nous posons sont : quels types d'objets se trouvent dans la zone de sursol, quels algorithmes de reconstruction utiliser ?

Nous nous proposons de regarder si un algorithme à base de primitives linéaires (segments de contours) peut être utilisé pour reconstruire l'objet (ou une partie des objets s'il y en a plusieurs) qui se trouve à l'intérieur de la zone.

Pour cela nous procédons à des croissances de région à partir des frontières de la zone de sursol et basées sur l'indicateur entropique. La plage de sursol est ainsi re-segmentée en zones structurées ou non structurées.

La figure B.4.8 montre quelques résultats. Nous y voyons l'intérêt d'un tel indicateur et l'intérêt d'opérer les croissances de régions à partir de la frontière: si la région correspond à un bâtiment bien contrasté, cela évite de créer des régions non structurées sur les superstructures du toit. Malheureusement certains contours de bâtiments peu contrastés sont des amorces de régions non structurées.



figure B.4.7 : détection des arbres sur image aérienne de paysage rural



figure B.4.8

Caractérisation des plages de sursol en zones structurées (en rouge) ou non structurées (en vert). L'algorithme procède par croissance de région à partir des frontières et une re-segmentation de la plage de sursol est effectuée en fonction des régions nouvellement formées.

Références

- [RUSKONÉ 96c] R. Ruskoné : *Extraction Automatique du Réseau Routier par Interprétation Locale du Contexte : Application à la production de Données Cartographiques*, thèse de Doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, 1996.
- [BAILLARD 96b] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H.Maître : *Extraction and Characterization of Above-Ground Areas in a Peri-Urban Context*, IAPR/TC7 Workshop on Methods for Extracting and Mapping Buildings, Roads and other Man-made Structures from Images, Graz (Austria), septembre 1996.

B.5 Le point sur les caméras numériques de l'IGN

Isabelle Jurvillier et Christian Thom

Introduction

Une caméra numérique, basée sur un capteur matriciel de 3072 par 2048 pixels de Kodak, destinée à la photographie aérienne et dédiée aux principales applications de l'Institut Géographique National, a été conçue, construite et mise au point au Laboratoire OÉMI durant l'année 1995.

Cette caméra a réalisé deux vols-test, le 15 janvier 1996 sur la région d'Amiens (Nord), et le 22 juillet 1996 sur la ville de Lyon (Rhône).

Les images rapportées de ces missions ont permis de démontrer que les images directement numériques présentaient des atouts certains face aux clichés argentiques numérisés, et que la caméra était utilisable été comme hiver. Les problèmes d'exploitation rencontrés lors de ces missions ont de plus inspiré les modifications apportées aux versions ultérieures de la caméra.

Contexte - objectifs

A l'heure où les processus photogrammétriques tendent à être de plus en plus automatisés, les images numériques prennent de plus en plus d'importance [GEOMATICA 95] [MILLS 96]. Il est donc important de chercher à obtenir les images numériques de la meilleure qualité qui soit, et, outre celui de l'IGN, de nombreux projets ont vu le jour ces dernières années [JADKOWSKI 94] [KALTENECKER 94] [GEOMATICA 95]

Citons de plus, l'explosion de projets de satellites d'observation de la terre à résolution métrique. L'abondance d'images numériques aura un impact positif sur notre projet, par un effet d'entraînement.

En effet, l'existence de données numériques entrainera un développement des dispositifs de traitement « tout numérique », et ceci résultera en une demande accrue d'images aériennes numériques, les échelles pouvant être atteintes en aérien dépassant celles visées par les projets spatiaux actuels.

Rappelons de plus que les caméras CCD, du fait de leurs caractéristiques radiométriques, peuvent être utilisées dans des conditions d'éclairage moins draconiennes que les caméras traditionnelles à film argentique.

Ceci permet d'étendre en principe les périodes de l'année pendant lesquelles les prises de vue aériennes peuvent être effectuées. Enfin, les images étant disponibles dès la sortie de l'avion, les délais de livraison du produit final (images, orthophotos ou cartes) sont raccourcis de toute la phase de développement et de numérisation des clichés.

État de la recherche en début d'année 1996

Caractéristiques de la caméra

Au début de l'année 1996, nous disposions donc d'une caméra dont les principales caractéristiques pourront être trouvées dans [THOM 97].

Rappelons tout de même qu'il s'agit d'un capteur de 3072 par 2048 pixels, permettant d'acquérir des images sur une dynamique de 8/12 bits au rythme de une toutes les 2/4 secondes, avec donc un pixel sol d'au moins 27/55 centimètres. Cette caméra a réalisé deux vols d'essais en 1996.

La mission du 15 janvier 1996

La première mission a eu lieu le 15 janvier 1996 sur la vallée de la Somme, avant et après la ville d'Amiens, vers une heure de l'après-midi [THOM 96a].

L'objectif qui fut utilisé est le vingt quatre millimètres d'Optique Thévon.

Un premier survol à 2000 mètres (pixel sol de soixante quinze centimètres) et un deuxième à 3000 mètres (pixel sol de un mètre) ont permis d'acquérir une cinquantaine d'images stéréo.

Une troisième bande de prise de vue, effectuée à 1200 mètres sur le chemin du retour, a permis d'obtenir quelques images au pixel sol de quarante cinq centimètres

L'éclairage hivernal, trop faible pour notre objectif dans lequel est intégré un ensemble de filtres, a conduit à poser 50 ms, ce qui est relativement long pour un cliché aérien.

Pour toutes les images, il a donc fallu mettre en œuvre la compensation électronique de filé (cinq à six pixels à 3000 et 2000 mètres, et quatorze pixels à 1200 mètres) qui a très bien fonctionné.

D'autre part, le soleil, très bas sur l'horizon, éclaire fortement de faibles surfaces comme les façades directement orientées vers lui, et laisse de très larges zones plongées dans l'ombre. Les images apparaissent ainsi contrastées d'une façon assez inhabituelle. Toutes les images ont été acquises en douze bits.

Malgré ces conditions particulières, les images sont de très bonne qualité, même dans les ombres.

Présentées à des reconstituteurs habitués à travailler sur images numériques, les images ont été jugées tout-à-fait restituables, alors que le pixel sol de soixante quinze centimètres représentait le double de celui auquel étaient accoutumés les opérateurs.

Ceci montre qu'une meilleure qualité radio métrique peut en partie compenser une perte de résolution géométrique.

Cette expérience nous a aussi montré que l'acquisition des données en douze bits était en fait pratiquement obligatoire, car tout passage sur huit bits ne pourrait se faire qu'avec perte d'information, du moins avec des algorithmes utilisables en temps réel lors de la prise de vue.

Toutefois, les conditions hivernales, difficiles par certains aspects (temps de pose long, par exemple) sont paradoxalement favorables pour d'autres : les ombres par exemple sont moins denses qu'en été. Il restait donc à faire la preuve que la caméra était aussi utilisable en période estivale.

Cela a été fait lors d'une mission sur Lyon, en juillet.

Mission sur Lyon du 22 juillet 1996

But de la mission

Notre objectif était ici le test de la caméra en zone urbaine dans des conditions estivales, avec donc des ombres très dures, pour faire la preuve de la supériorité de ce type de prise de vue sur les dispositifs classiques, pour ce qui est d'obtenir des informations dans les zones ombragées [THOM 96b].

Le choix de la ville de Lyon nous a été dicté par l'intérêt manifesté par la COURLY pour nos travaux, cette communauté urbaine étant grande utilisatrice d'orthophotos [PIJOURLET 96].

Les besoins de cet utilisateur s'orientant vers des pixels sol très petits (selon nos normes...) de douze centimètres, nous nous sommes efforcés de nous rapprocher de cette valeur autant que possible, les performances actuelles de la caméra ne nous permettant cependant pas de l'atteindre.

Réalisation de la mission

L'utilisation de l'objectif de vingt-quatre millimètres de focale nous a obligé à voler très bas pour obtenir le pixel sol le plus petit possible.

Les restrictions liées au trafic aérien nous ont imposé de faire la plus grande partie du vol à 1500 mètres, obtenant un pixel sol de cinquante cinq centimètres, et un court survol de la presqu'île (une bande) à 1000 mètres (pixel sol de trente neuf centimètres).

Nous avons donc réalisé une couverture à moyenne échelle d'une zone de 7 x 11 km² avec des pixels de cinquante cinq centimètres et une bande à grande échelle de 1,2 x 6 km² avec des pixels de trente-neuf centimètres.

De plus, une bande supplémentaire à cheval sur deux bandes moyenne échelle a été acquise pour permettre de tester des algorithmes de corrélation multi-stéréo.

L'heure solaire de la prise de vue était environ onze heures, résultant en des ombres très denses, encore renforcées du fait de la météo très claire qui régnait ce jour là.

Cent quatre-vingt quatorze images au total ont été ramenées, représentant environ 2,4 Giga octets.

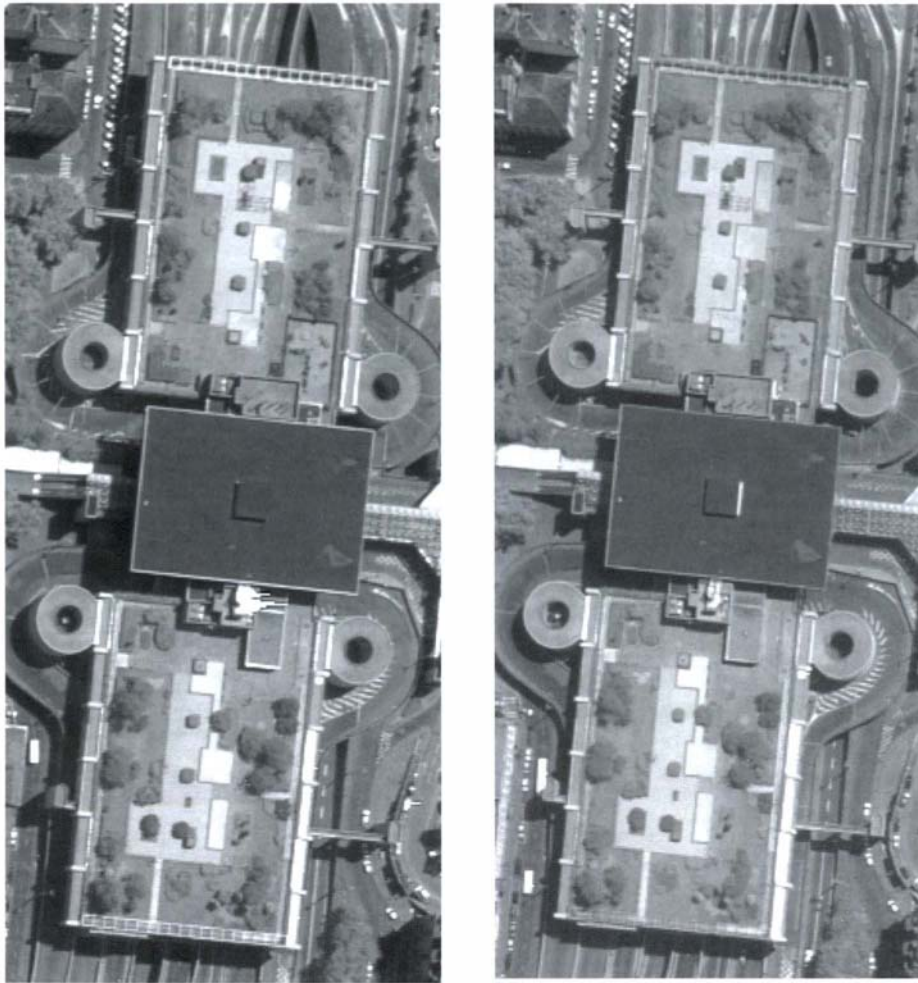


figure B.5.1

*Mission sur Lyon (Rhône)
du 22 juillet 1996.*

*Vue en stéréo de la gare
de Fourvière, pixel-sol de
cinquante cinq centimètres.*

Résultats et enseignements

Les ombres

Une petite étude comparative avec Amiens a été réalisée sur le sujet des ombres. Il a été montré que les ombres sont comme prévu plus denses en été qu'en hiver. On peut considérer que le pourcentage de nombre de niveaux de gris utilisés pour représenter les zones ombragées par rapport au nombre de niveaux de gris utiles dans l'image totale est entre deux et trois fois plus grand en hiver qu'en été (cf figure B.5.2). De même, le nombre de pixels de l'image pouvant être considérés comme "à l'ombre" est deux à trois fois plus grand en hiver qu'en été. Pourtant, la présence en hiver de façades très éclairées par un soleil bas sur l'horizon génère un risque de surexposition si une marge de dynamique importante n'est pas prévue au moment de la prise de vue.

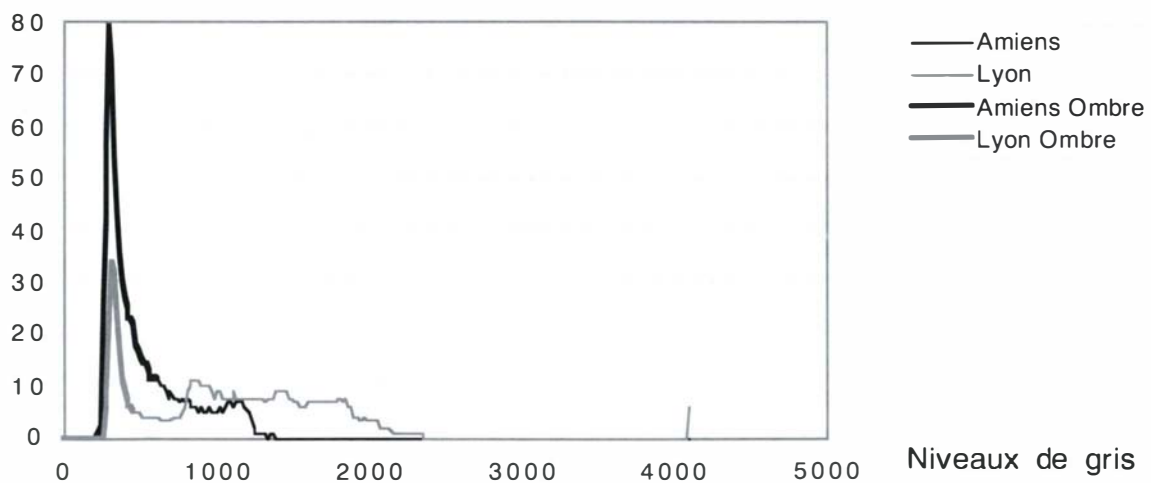


figure B.5.2

*Histogramme des niveaux de gris dans deux images prises
dans deux saisons différentes : Amiens en hiver et Lyon en été.*

Qualitativement, ces résultats sont évidemment triviaux car complètement prévisibles : ce sont des effets de lois physiques et géométriques simples. Pourtant, les ordres de grandeurs, bien qu'approximatifs, ont un certain intérêt pour juger de l'opportunité de réaliser des missions hivernales en zone urbaine.

Ils ne peuvent toutefois remplacer l'examen des images par des opérateurs compétents. L'aspect visuel des images est en effet très différent d'une saison à l'autre, comme on pourra le voir sur la figure B.5.3.

En tout état de cause, malgré la densité des ombres, les images estivales de Lyon se sont révélées tout-à-fait exploitables, y compris dans celles-ci, grâce à l'usage de traitements informatiques toutefois



Amiens en hiver

Lyon en été

figure B.5.3

Notez la différence de longueur des ombres et de leur densité. Cet effet a été ici réduit par l'usage d'une table de transformation des niveaux de gris qui étale les ombres. Sans cet artifice, les ombres auraient été saturées en noir sur ces sorties.

Améliorations de l'ergonomie et du système en général

Chaque mission permet de détecter des problèmes d'exploitation ou des améliorations à apporter au système. Ici, il a été constaté que le difficile problème de l'amortissement des vibrations n'était pas encore réglé. De plus, l'acquisition des tops GPS n'a pas fonctionné, sans doute à cause d'une chambre traditionnelle branchée en parallèle, mais non alimentée.

Production d'orthophotos

A cause de la taille des pixels, aucune orthophoto n'a été produite pour la COURLY. Néanmoins, quelques images ont été utilisées à l'IGN par le Service de Photogrammétrie et de Cartographie Numérique (SPCN), pour produire une petite orthophoto pour le CNES, à titre d'essai. Ceci a permis de montrer la faisabilité de la chose, avec les moyens de production actuels. La réalisation de l'aérotriangulation a été testée elle aussi du même coup. Des paramètres de calibration géométrique de la caméra en ont été déduits. On a vu que ce qui limite actuellement la taille de nos pixels au sol, et donc notre capacité à répondre aux besoins de certains utilisateurs comme la COURLY, est d'une part la vitesse de lecture/sauvegarde des données de notre caméra, d'autre part la courte focale de notre optique qui nous oblige à voler à des altitudes très basses, en général proscrites au dessus des villes. En ce qui concerne les moyennes échelles, là c'est le contraire : le format rectangulaire du capteur associé à une focale relativement longue entraîne un rapport B/H probablement trop petit pour permettre une exploitation correcte des images en stéréo.

Tous ces points nous ont amenés à envisager de réaliser une nouvelle version de la caméra, plus petite, sur laquelle pourraient être montés des objectifs ROLLEI/ZEISS de plus longue focale, et dans laquelle pourrait être aussi installé le capteur KODAK de 4096 x 4096 pixels, plus adapté aux prises de vue moyenne échelle, voir [THOM 96b].

Nouvelles caméras

Réalisation d'une nouvelle version de la caméra

Les améliorations visées par cette nouvelle version sont donc :

- format plus compact et poids moins important, pour une éventuelle installation dans un drone,
- fréquence d'image plus grande pour obtenir des pixels sol plus petits,
- utilisation de disques plus capacitifs (dix Giga octet) et plus rapides (10 Mo/s),
- possibilité d'adapter des optiques ROLLEI à obturateur central rapide mais aussi nos anciens objectifs et éventuellement un nouveau de courte focale (vingt-quatre millimètres) mais à plus grand champ que l'actuel, non proposé par ROLLEI,
- possibilité d'adapter relativement simplement un capteur plus grand de 4k x 4k pixels.

Caméra 4k x 4k

L'utilisation d'un capteur 4k x 4k avec une optique de 24 mm devrait permettre de se rapprocher notablement des conditions de prise de vue traditionnelles : le B/H vaudra environ $0,4 \times 4096 \times 9e - 6 / 24e - 3 = 0,61$ à comparer avec les chambres traditionnelles : $23e - 2 \times 0,4 / 0,152 = 0,605$. La fauchée sera avec des pixels sol de soixante dix centimètres de 2,8 kilomètres, c'est-à-dire *grosso modo* la moitié de celle d'une chambre de prise de vue analogique; entre deux et trois fois plus de bandes seront donc nécessaires pour couvrir une zone donnée. Il semble que cet inconvénient ne soit pas incompatible avec un usage en production, compte-tenu des avantages liés au capteur tout numérique. Ce capteur servira à réaliser un essai en vraie grandeur pour la BDTOPO, pour évaluer les surcoûts liés à ce procédé, ainsi que ses réels avantages.

Caméra couleur

La nouvelle caméra, comme l'ancienne, permet l'usage du capteur couleur acquis en 1996. La chaîne d'acquisition temps-réel et le logiciel d'exploitation doivent toutefois être adaptés à ce capteur. De même, l'existence d'images en couleur nécessite la refonte des logiciels de traitement en temps différé, et même la création de nouveaux utilitaires. En attendant que ces travaux logiciels soient terminés, le nouveau capteur couleur a été testé en laboratoire et semble convenir à notre application; seule une mission aérienne pourra toutefois complètement le qualifier.

Perspectives pour 1997

Utilisation des caméras

Plusieurs vols sont donc prévus durant l'année 1997 :

- un vol pour le CNES sur l'Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection (ARAT),
- un vol avec un capteur couleur,
- un vol sur zone urbaine à grande échelle, pour tester les algorithmes mis au point au laboratoire MATIS en vue de la restitution automatique des bâtiments,
- un vol avec le capteur 4k x 4k pour la BDTOPO,
- un vol sur drone.

L'accroissement du nombre des vols d'année en année révèle bien le gain d'intérêt des utilisateurs pour notre instrument, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'IGN.

Exploitation des images

Là aussi, une ouverture plus grande va se faire sentir : les images de la mission CNES seront exploitées évidemment par le CNES, avec éventuellement réalisation par l'IGN d'orthophotos, la mission pour le laboratoire MATIS sera exploitées conjointement par les laboratoires MATIS et LOÉMI, et d'une manière générale, une étude est lancée en collaboration avec l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (Evry) en vue d'une exploitation optimale des images numériques, visant notamment à la suppression des ombres dans les orthophotos; de même, la mission BDTOPO sera exploitée dans une ligne de production numérique.

Industrialisation

Rien de certain n'est encore en vue pour 1997, mais diverses pistes restent ouvertes, notamment une, basée sur l'utilisation des nouveaux grands capteurs de Philips (7000 x 8000 pixels). Ces capteurs sont évidemment d'un grand

intérêt pour nous, leur résolution leur permettant réellement de se comparer aux caméras traditionnelles. Leur prix, malheureusement, reste pour l'instant dissuasif

Conclusion

La bonne qualité des images rapportées des deux missions de 1996 a suscité un intérêt certain, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'IGN, qui ne pourra, nous l'espérons, que s'étendre en 1997. Cela s'est manifesté par des commandes de vols en 1997, qui si elles ne sont pas encore commerciales, n'en sont pas moins encourageantes pour notre projet; de même, l'utilisation de nos images, toujours à titre expérimental certes, dans les services de production dénote une évolution favorable de la situation. Il est probable que 1997 amplifiera ce tournant entamé en 1996, et apportera aussi des clarifications importantes dans le domaine de l'industrialisation de la caméra.

Références

- [GEOMATICA 95] Revue spéciale de Geomatica sur la *photogrammétrie à l'aide d'images numériques au Canada*, volume 49, numéro 4, décembre 1995.
- [MILLS 96] JP. Mills et al : *Aerial photography for survey purposes with a high resolution small format, digital camera*, Photogrammetric record, pp. 575-587, octobre 1996.
- [JADKOWSKI 94] *Aerial CCD camera system for pipeline right-of-way management*, First International Airborne Remote Sensing Conference, Strasbourg (F), 12-15 septembre 1994.
- [KALTENECKER 94] A. Kaltenecker et al : *Digital photogrammetric assembly (DPA) - an airborne stereo and multispectral imaging and evaluation system*, First International Airborne Remote Sensing Conference, Strasbourg (F), 12-15 septembre 1994.
- [PIJOURLET 96] P. Pijourlet & M. Pocho : *L'utilisation de la photo aérienne dans le système d'information géographique du Grand Lyon*, in Géomètre, pp. 34-37, janvier 1996.
- [SOUCHON 96] JP. Souchon : *Mise en œuvre de la caméra numérique*, projet de stage de filière de troisième année du cycle ITGCE, ENSG, IGN, DT, SR, Laboratoire OÉMI, SR 960006/L-STA, 27 septembre 1996.

Publications

- [THOM 96a] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Fabrication d'une caméra numérique aérienne*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 65, pp. 20-25, 1996
- [THOM 96a] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Compte-rendu de la première mission aérienne de la nouvelle caméra numérique - Amiens, 15 Janvier 1996*, IGN, DT, SR, Laboratoire OÉMI, SR 960001/L-RAP, 1996.
- [THOM 96b] Ch. Thom & JP. Souchon : *Compte-rendu de la deuxième mission aérienne de la nouvelle caméra numérique - Lyon, 22 juillet 1996*, IGN, DT, SR, Laboratoire OÉMI, SR 960003/L-RAP, 1996.
- [JURVILLIER, THOM 96a] I. Jurvillier & Ch. Thom : *IGN New Aerial Digital Frame Camera for Photogrammetry*, in Proceedings of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, vol. 2, pp. 156-164, IGN, SR 960002/L-COM, 24-27 juin 1996,
- [JURVILLIER, THOM 96b] I. Jurvillier & Ch. Thom : *Premières images de la nouvelle caméra aérienne numérique*, in Revue Internationale de Géomatique, vol. 6, n° 2-3/1996, pp. 163-174, IGN, SR 960005/L-ART, 1996

B.6 Automatisation du positionnement des écritures linéaires

Mathieu Barrault

Introduction

Les écritures ont un rôle prépondérant sur une carte par la multiplicité des informations qu'elles apportent. En plus de leur valeur sémantique, le nom des objets (les toponymes) ou autres (les points cotés...), elles offrent d'autres informations grâce à divers paramètres typographiques comme la police, la taille et l'emplacement.

Contrairement aux paramètres typographiques, définis par les spécifications, le positionnement d'une écriture associé à un objet est laissé au libre arbitre du cartographe qui doit assurer l'identification de l'objet associé, tout en respectant le fond de carte, afin de ne pas masquer ou mutiler les objets déjà présents. De plus, il doit fournir une qualité esthétique contribuant au meilleur rendu possible.

Le positionnement des écritures est une phase conséquente de la création d'une carte qui reste très longue, même si l'arrivée d'outils informatiques interactifs en a diminué le coût. Le laboratoire COGIT s'est penché sur le problème à partir de 1992 et a proposé un premier processus de positionnement automatique des écritures ponctuelles (près de 80% des écritures présentes sur une carte, mais aussi les écritures dont les règles restent les plus simples à modéliser) très encourageant puisque plus de 85% des écritures étaient positionnées de manière satisfaisante [LECORDIX et al 94]. Fort de ses résultats, les recherches ont été poursuivies sur les pastilles kilométriques [MARRROT 94] et sur les noms de routes [BARRAULT 95b] (cas particuliers des écritures linéaires) et puis sur les objets linéaires quelconques et les noms de rues.

Cet article présente le résultat des travaux sur le positionnement des objets linéaires quelconques. Pour cela, une première partie précise la spécificité du positionnement des écritures linéaires, suivie d'une description des problèmes auxquels doit faire face le processus d'automatisation et les méthodes préconisées pour les surmonter. L'algorithme général de positionnement des écritures linéaires, incluant l'approche commune à toutes les écritures et les particularités des écritures à disposition linéaire, est exposé.

Nommer un objet linéaire

La complexité de cette automatisation est autant dans le transfert du processus manuel vers un processus automatique que dans la modélisation exhaustive de celui-ci. En effet, les règles que l'on trouve sur le placement des écritures sont des grands principes difficiles à exploiter, ou des conseils plus précis mais qui peuvent se contredire entre eux.

Des principes généraux

Imhof [IMHOF75] ou Alinhac [ALINHAC 64] décrivent une approche globale du positionnement des écritures que l'on peut résumer en six points :

- le nom doit être lisible et aisément détecté,
- le nom et l'objet auquel il appartient doivent être facilement identifiables,
- la position doit éviter, ou du moins minimiser les mutilations, les recouvrements de symboles déjà présents sur la carte. Les superpositions entre écritures sont interdites,
- l'écriture, par sa position, sa forme et sa police, doit exprimer la situation spatiale et l'étendue de l'objet associé ainsi que des informations comme l'importance de cet objet, la différence avec d'autres objets ...
- les polices doivent traduire la classification et la hiérarchisation des objets,
- les écritures ne doivent être ni trop dispersées, ni trop regroupées.

Ces principes sont accompagnés de règles plus précises. Ces règles varient selon le type d'objet qu'elles doivent nommer.

Les écritures des objets ponctuels sont appelées *écriture à position*, du fait que l'écriture doit suivre une ligne de base horizontale (sauf en cas de très petites échelles ou l'écriture peut suivre les parallèles).

Les écritures des objets linéaires ou surfaciques sont dites à *disposition*, car la ligne de base peut être courbée afin d'épouser la forme principale de l'objet.

Entre les principes généraux et les règles spécifiques existent un certain nombre de règles plus ou moins sous-entendues qui concerne l'ensemble des écritures qui ne seront pas développées ici, mais que l'on peut résumer en trois points :

— le premier est assurer l'identification de l'association entre l'écriture et l'objet. Le lecteur d'une carte doit retrouver sans ambiguïté le nom d'une rivière et reconnaître ou est situé le village que le toponyme définit. Nous verrons plus loin que la manière d'assurer cette identification varie selon le type d'objet mais le but reste le même,

— le deuxième est le respect du fond de carte. Une écriture doit éviter au maximum de cacher et même de mutiler une autre information de la carte. Typiquement, une écriture peut écraser une portion d'une route mais ne doit pas écraser un carrefour. Enfin, les écritures doivent être lisibles. Des écritures ne doivent non seulement se superposer mais ne peuvent former des figures géométriques ou être trop proches au risque de ne plus pouvoir les lire,

— enfin, les règles propres à chaque type d'objet recherchent une rigueur esthétique qui assure à la carte sa qualité.

La spécificité des objets linéaires

Voici les principales règles que l'on trouve dans la littérature concernant le positionnement des noms sur les objets linéaires :

1. Les écritures doivent être placées le long des lignes auxquelles elles se rapportent.
2. L'espacement objet-nom sera compris entre une demie et une fois la hauteur du corps d'écriture. La ligne de pied des caractères doit épouser la forme de la ligne à désigner.
3. L'écriture doit être placée de préférence au dessus de la ligne (sauf pour les objets linéaires devant contenir le nom, comme les noms de rues).
4. Le nom à placer ne doit pas traverser la ligne à laquelle il se rapporte.
5. On privilégiera les positionnements le long des parties rectilignes, de préférence horizontales ou quasi telles.
6. On doit éviter de positionner les noms selon des courbures extrêmes ou complexes, et négliger les irrégularités de faible amplitude des lignes.
7. On évitera d'écrire les noms sur des parties verticales. Si on ne peut faire autrement, on doit écrire de haut en bas pour les lignes situées dans la partie droite de la carte, et de bas en haut pour les lignes situées dans la partie gauche. Dans les cas non verticaux, les noms doivent toujours être écrits de gauche à droite.
8. On doit assurer la continuité des caractères; on n'étalera pas le nom le long de la ligne.
9. L'espacement entre les caractères doit être visuellement constant.
10. L'espacement entre les différentes parties du nom doit être identique visuellement.
11. On répétera les noms à intervalles suffisants pour éviter les ambiguïtés.
12. On évitera que le nom soit séparé de l'objet par un détail.

On découvre à travers ces règles la spécificité des objets linéaires.

Ce sont des écritures à disposition, la ligne de base peut, et même la plupart du temps doit, être courbée afin de suivre l'objet linéaire, ce qui introduit naturellement des contraintes supplémentaires sur le type de courbure à cause de la typographie (les caractères ne doivent pas se superposer et un trop grand écart entre deux caractères ne peut être toléré).

De même, l'écart inter-mot d'une écriture est une variable supplémentaire dont il faudra tenir compte. Ces contraintes contribuent à assurer l'appartenance de l'écriture à l'objet mais aussi à respecter la qualité esthétique de la carte.

D'autre part, un objet linéaire, de part sa taille et, dans la majeure partie des cas, son appartenance à un réseau complexifie son identification et doit donc avoir son écriture répétée plusieurs fois.

Là encore, une bonne répartition des différentes itérations de l'écriture de l'objet linéaire complique la modélisation du problème à la fois par une bonne définition de la répétition et par la prise en compte de l'écart inter-écriture.

Les problèmes

Les spécificités décrites ci-dessus sont, bien entendu, les sources de problèmes qu'un processus d'automatisation doit résoudre et intégrer. Voici en quoi elles posent problème et comment nous pouvons les prendre en compte.

La répétition de l'écriture

La redondance de l'écriture d'un objet linéaire le long de celui-ci contribue tout d'abord à simplifier la lecture de la carte. Plus elle est répétée, plus le lecteur identifiera aisément l'objet associé, évitant de parcourir tout l'objet pour retrouver le texte.

D'autre part, le suivi d'un objet linéaire à travers un réseau et d'autant plus difficile que le réseau est dense. La répétition de l'écriture permet alors d'assurer le suivi.

Mais une répétition trop importante de l'écriture risque de nuire à la qualité de la carte. Cette sur-information va densifier la carte inutilement et risque de gêner le positionnement d'autres écritures. Il faut trouver un compromis sur le nombre d'itérations que doit porter l'objet linéaire.

L'approche préconisée consiste à découper l'objet linéaire en portions afin de positionner une et une seule écriture sur chacune de ces portions. Ces portions vont donc être découpées de manière à respecter une série de critères définis plus loin.

Comment découper ?

Le premier critère, la *taille*, est le plus simple à prendre en compte. Deux itérations voisines d'une écriture ne peuvent être trop éloignées l'une de l'autre au risque de perdre l'utilité de la répétition.

Il suffit alors de limiter la taille de chaque portion à nommer afin d'assurer que, quelque soit le positionnement de chaque itération, une distance maximale sera assurée.

En se contentant de cette définition, nous pouvons arriver à des situations extrêmes (deux noms collés puis les deux suivants très espacés). Ce risque est pris en compte dans le processus global décrit en fin d'article.

Le critère de *densité* n'a jusqu'à présent jamais été pris en compte dans les procédés déjà développés. La densité d'un réseau perturbe le suivi d'un objet linéaire. La modification de la symbolisation de l'objet, ou le croisement avec d'autres objets sont des ambiguïtés qu'il faut minimiser. Pour tenir compte de ce critère, une définition de points significatifs est introduite ci-dessous et un maximum de P points significatifs par portion sera toléré.

Où découper ?

Un point significatif est point où le suivi de l'objet est ambigu. Un point où la symbolisation change d'un même objet linéaire change est n pont significatif; de même pour un croisement. Mais certains sont plus ambiguës que d'autres (un carrefour ou un changement de symbolisation peuvent être sans ambiguïté [BARRAULT 95b]). En appelant un point de rupture un point significatif véritablement ambigu, une répétition des écritures autour d'un point de ce type doit être assuré. Ce sont les points de rupture qui serviront de premier découpage de l'objet linéaire en portions.

Pour résumer, un objet linéaire sera découpé sur ces points de rupture en portions. Si une portion est trop grande, de taille est supérieure à T_{max} , ou trop dense, nombre de points significatifs supérieur à S_{max} , la portion sera à nouveau découpée sur un des points significatifs pour respecter les critères.

Mais ces critères ne sont pas les seuls à être pris en compte. Ils pourront même être négligés au profit de la règle non pas cartographique, mais algorithmique que nous développons ci-dessous : chaque portion doit posséder N positions possibles pour l'écriture.

La qualité intrinsèque d'une écriture

La plupart des règles définissent la qualité intrinsèque d'une écriture d'un objet linéaire, à savoir la qualité de l'écriture uniquement par rapport à l'objet linéaire et le fond de carte, sans tenir compte des autres écritures (dont le comportement est défini dans les grands principes).

Il faut donc trouver des *positions possibles* pour chaque portion de l'objet, des positions qui respectent les règles définies.

Que ce soit pour positionner sur l'objet linéaire ou pour un décalage au dessus ou en dessous, les courbures extrêmes doit être évitées. Ceci pour que les caractères ne se superposent pas et que la lecture reste aisée. Néanmoins, les variations de faible amplitude doivent être négligées.

Pour des objets linéaires comme le réseau hydrographique, la forme peut être très chaotique et la limite entre les courbures extrêmes et négligeables devient floue.

Un pré-traitement classique (algorithme de Douglas, lissage gaussien... [PLAZANET 96]) est alors insuffisant car un lissage faible ne supprimera pas les courbures extrêmes et un algorithme plus radical risque de camoufler ces mêmes courbures, voire d'éloigner l'écriture de l'objet initial.

Enfin, si l'écriture doit être décalée (positionnée au dessus ou au dessous), ces biais peuvent être amplifiés. Afin d'éviter ces défauts, nous allons caractériser chaque portion par sa courbure pour différencier les courbures extrêmes des bruits.

Caractérisation et découpage

Les objets linéaires sont caractérisés par des polygonales (séries de segments). Leur caractérisation pose alors les problèmes de géométrie discrète classique.

Comme nous l'avons introduit, la courbure joue un rôle important dans le positionnement d'écriture sur un objet linéaire. C'est pourquoi il est important d'obtenir une estimation de celle-ci afin de caractériser la polygonale.

Estimation de la courbure

La courbure réelle $K(s)$ d'une polygonale en fonction de son abscisse curviligne n'est pas exploitable puisqu'elle est nulle partout sauf aux extrémités des segments où elle est infinie. Néanmoins, elle peut être estimée en la moyennant avec son voisinage (définie par la valeur de σ).

$$K_{\sigma}(s) = \sum_{i=1}^{n-1} d\theta_i \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-s_i}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

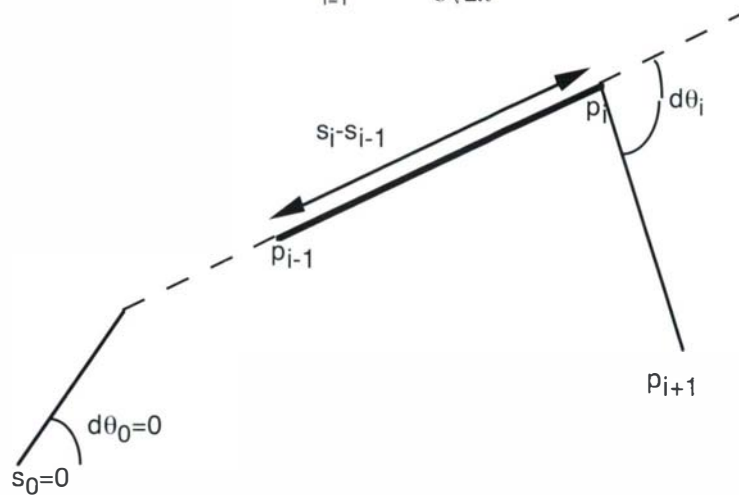


figure B.6.1 : estimation de la courbure d'une polygonale

Cette fonction $K_{\sigma}(s)$ nous permet d'estimer la courbure en n'importe quel point de la polygonale. La valeur de σ est prise en fonction de la police de caractère de l'écriture.

La taille d'un caractère est une bonne approximation puisque la prise en compte du voisinage permet d'estomper les courbures qui ne sont que du bruit et de conserver les courbures extrêmes.

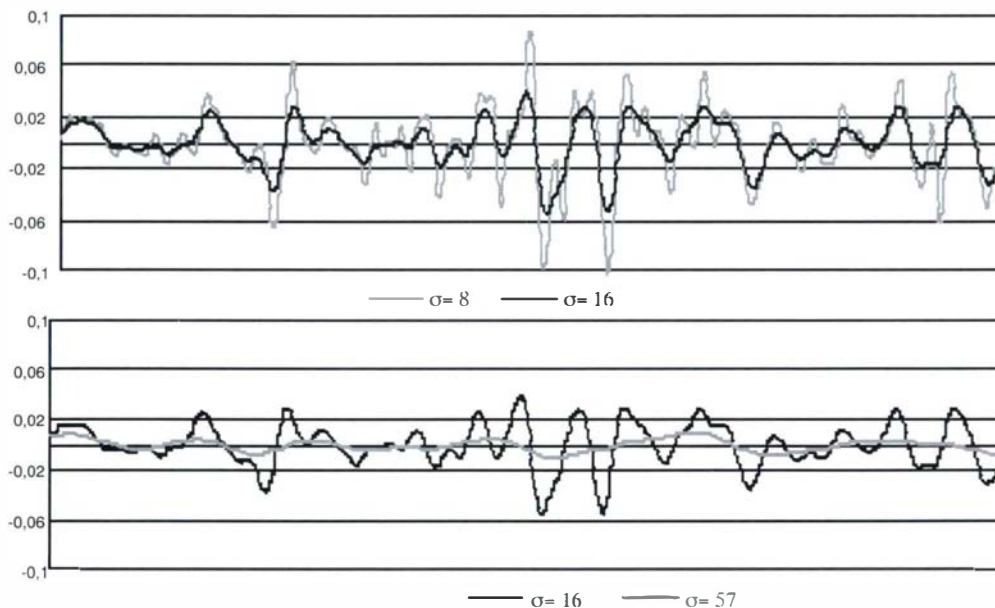


figure B.6.2 : courbures de l'arc 221 à différents σ

Découpage sur la courbure maximale

En définissant une courbure maximale K_{max} acceptable pour l'écriture, en tenant compte du s utilisé pour l'estimation, nous pouvons alors contrôler tous les points de la polygonale et supprimer ceux dont la courbure estimée est supérieure.

Notre portion est alors découpée en tronçons.

Certains de ces tronçons contiennent les micro-variations estompées par la courbure estimée. Ils doivent donc subir un traitement afin de lisser ces bruits.

Le décalage

La plupart des écritures d'objets linéaires doivent être positionnées au dessus ou en dessous de la courbe. Ce décalage peut s'effectuer par une dilatation de la courbe. Mais cet opérateur conserve les bruits et diminue la qualité de l'écriture.

Un opérateur lissant les bruits tout en ne s'éloignant pas de façon remarquable de la courbe doit être appliqué.



figure B.6.3 :
arc 221 issu du réseau hydrographique de la BDTPO



figure B.6.4 :
les points de courbure estimée trop forte

La fermeture avec un cercle

En morphologie mathématique, la fermeture est un opérateur composé d'une dilatation et d'une érosion dont le but est, en autres, de lisser les formes en traitement d'images [SCHMITT 93].

Nous pouvons reprendre cette notion et l'appliquer à des formes vectorielles en utilisant un algorithme de symbolisation [MUSTIÈRE 95].

Nous symbolisons le tronçon à lisser avec une distance ($R + \text{Ecart}$). Puis, nous appliquons l'opérateur de symbolisation sur les courbes obtenues avec une distance $-R$.

La variable *Ecart* correspond à la distance souhaitée par le cartographe de l'écriture à la courbe (entre 0,3 et 0,5 fois la hauteur d'un caractère). La variable R correspond au paramètre de lissage. Plus il est grand, plus les bruits seront lissés mais un paramètre trop grand pour une polygonale finie n'aura plus de sens (un demi cercle de rayon r inférieur à R n'a pas de symbolisation de distance R).

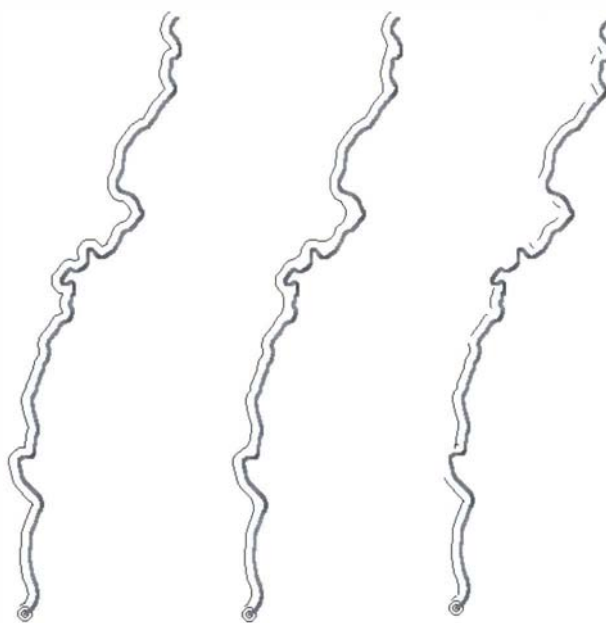


figure B.6.5 : *l'arc dilaté, fermé, et fermé sur tronçons*

D'autres points de découpage

En plus des points de courbure maximale, et lorsque le mot doit être décalé, nous pouvons utiliser les points de carrefours où un autre objet linéaire arrive du côté où le mot doit être décalé.

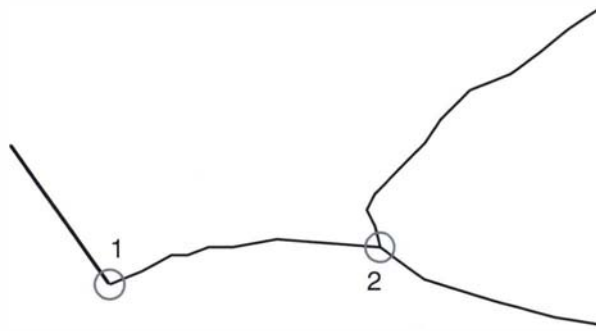


figure B.6.6 : exemple de point supplémentaire de découpage

Sur la figure B.6.6, le point 1 est un point de courbure extrême.

Le point 2 sera pris en compte pour définir un tronçon si le nom doit être positionné au dessus de l'écriture ou sur l'écriture (il faut éviter de dissimuler les informations).

Par contre, il ne sera pas pris en compte si l'écriture doit être positionnée en dessous.

La recherche de positions possibles

L'objet linéaire est découpé en portions. Chaque portion est découpée en tronçons.

Si l'écriture ne contient qu'un seul mot, il suffit de faire glisser ce mot sur chacun de ces tronçons et pour chacune des positions testées, estimer leur qualité (voir ci-dessous).

Mais si l'écriture contient plusieurs mots, appliquer le même principe pour chaque mot et vérifier toutes les combinaisons possibles augmente la durée de recherche de façon exponentielle.

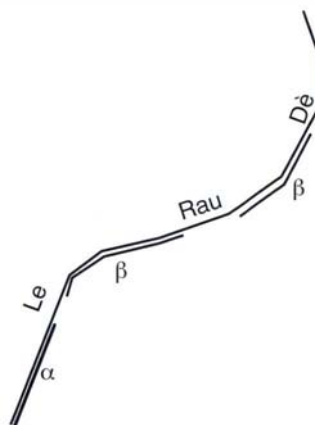


figure B.6.7 : le couple (α, β) de positionnement

Pour palier ce surcoût, sachant que l'écart inter-mots doit être le même entre chaque mot de l'écriture, je définis un couple (α, β) tel que α , est la position du premier mot et β l'écart entre chaque mot.

Ces deux variables sont tirées aléatoirement et à chaque couple est renvoyé une estimation de la validité et de la qualité de l'écriture par une quantification de celle-ci.

Sans entrer dans les détails, il faut préciser que des micro-positionnements au niveau de l'écriture est de chaque mot sont effectués afin de supprimer les effets de bord que le tirage aléatoire pourrait provoquer.

La quantification de la qualité

Même si nos tronçons, ou lignes de support de l'écriture, respectent désormais les critères cartographiques, il existe plusieurs positions possibles.

Il faut contrôler la position de l'écriture par rapport au fond de carte.

Pour cela, la solution d'une image raster, reste pour l'instant, la méthode la plus rapide.

Le fond de carte est transformé en une matrice où chaque valeur correspond à un coût d'écrasement par une écriture linéaire. Certaines sont même interdites.

Pour un nom de rivière qui doit être décalé, aucune rivière ne doit être mutilée par ce nom.

Les valeurs de la matrice correspondant aux rivières seront donc éliminatoires pour les positions possibles qui les superposeraient.

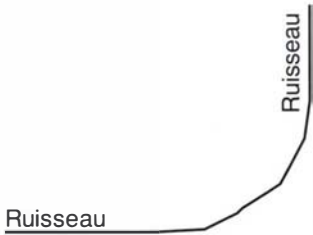

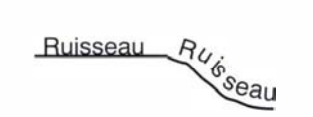
Les autres valeurs correspondent à des éléments de la carte qui peuvent être écrasés, mais moins un nom inutile d'informations, plus la qualité du positionnement est bonne.

Ce critère peut être aisément en calculant la moyenne des valeurs des pixels superposés par un mot pour obtenir une quantification du critère de mutilation.

Il existe d'autres critères de qualité au niveau de chaque mot, de l'écriture et de l'objet linéaire.

Le Mot

Pour chaque mot, sa qualité va être estimée par :

<p><i>Le fond de carte</i> Nous venons de l'expliquer ci-dessus.</p>	<p>(Fc)</p>	
<p><i>Angle moyen</i> L'orientation générale du mot est importante pour la lecture; plus elle proche de l'horizontale, mieux c'est.</p>	<p>(An)</p>	
<p><i>Courbure moyenne</i> Plus le mot est courbé, moins sa qualité est bonne.</p>	<p>(Km)</p>	
<p><i>Variance de courbure</i> Si le mot doit être courbé, moins sa courbure varie mieux c'est.</p>	<p>(Vm)</p>	

L'Écriture

De même, des critères inter-mots sous-entendus doivent être pris en compte.

Les mots (Mt)
La qualité de chaque mot doit être pris en compte dans la qualité de l'écriture. L'ensemble des paramètres propres à chaque mot est intégrée dans une fonction quadratique pondérée,

$$Mt(p) = \sum_{j=1}^{Nm} [\alpha Fc_{i,j}(p)^2 + \beta An_{i,j}(p)^2 + \delta Km_{i,j}(p)^2 + \epsilon Vkm_{i,j}(p)^2]$$

$$\alpha + \beta + \delta + \epsilon = 1$$

où Nm est le nombre de mots de l'écriture et chacune des variables est normalisée sur [0, 1],
 p est une position de l'écriture sur la portion.

La variance de la distance inter-mot (Vim)
En fait, ce critère est inclus dans la recherche des positions testées comme il l'a été précisé plus haut. Il n'est rappelé ici qu'à titre informatif.

L'écart maximum de la variation d'angle entre chaque mot (Ean)
Enfin, le critère de changement d'orientation d'un mot au suivant est important. Plus la variation d'orientation est faible, mieux c'est. Pour quantifier cela, nous prenons le changement maximum d'orientation entre deux mots de la position possible.

Le côté (Ct)_i
Si l'écriture doit être décalée, elle doit être préférée au dessus plutôt qu'en dessous. Mais il arrive qu'une portion ne puisse avoir de position au dessus.

Le critère de côté est donc intégré dans la fonction de quantification.

Sur un jeu de soixante portions à nommer de taille quelconque (feuille BDTOP0 d'Amplepuis), on obtient, en tenant compte que de la qualité intrinsèque de l'écriture, soixante écritures positionnées sur soixante sept, en deux minutes sur une station DEC Alpha.

L'objet linéaire

La qualité du positionnement des différentes itérations d'une écriture entre elles sur un objet linéaire peut aussi être mesuré en fonction d'un critère.

La variance de la distance inter-écriture

(Vie)

Tout comme l'écart entre chaque mot d'une écriture doit être le même, l'écart entre chaque écriture d'un même objet linéaire doit être, dans la mesure du possible, le même. Plus la variance de l'écart est grand, moins la qualité sera bonne.

Une fonction de quantification

Pour intégrer les mesures de chacun des critères, une fonction quadratique pondérée est utilisée. La pondération de chaque critère est empirique car la priorité d'un critère par rapport à un autre n'est pas clairement défini.

$$FC(p_1^k, \dots, p_{N_i}^k) = uVi(ep_1^k, \dots, p_{N_i}^k)^2 + v \sum_{i=1}^{N_i} [aMt(p_i^k)^2 + bVim_i(p_i^k)^2 + cEan_i(p_i^k)^2 + dCt_i(p_i^k)^2]$$

avec :

$$u + v = 1$$

$$a + b + c + d = 1$$

N_i , le nombre d'itérations sur l'objet linéaire, où chaque variable est normalisée.

Les problèmes et les solutions proposés pour l'association d'une écriture à un objet linéaire viennent d'être décrits ci-dessus. Mais la recherche de positions satisfaisantes pour un objet s'intègre dans un processus plus global. Ce processus est le même que celui qui a été appliqué pour les écritures à position. La différence principale est le pré-découpage d'un objet linéaire afin d'obtenir une écriture par portion, ainsi que la qualification d'une position (mot à disposition et pluralité des mots dans l'écriture).

Le traitement global

Voici donc le processus global utilisé pour positionner les écritures d'objets linéaires en tenant compte du fond de carte et de la qualité intrinsèque des écritures, mais en incluant aussi la gestion des conflits inter-écritures, à savoir, la superposition et la promiscuité entre mots.

Découpage de chaque objet linéaire en portions

Le traitement est décrit ci-dessus.

Recherche de N meilleures positions possibles pour chaque portion

Nous avons explicité comment définir les lignes de base sur lesquelles vont glisser les mots de l'écritures, comment nous testons des positions et comment nous supprimons les positions, interdites par le fond de carte, et quantifions la qualité des positions possibles. Les N meilleures couples (α , β) sont conservés et classés.

Gestion des conflits Ecritures-Ecritures

Il reste à traiter le risque de conflits entre écritures. Deux écritures ne doivent pas se superposer ni être trop proches. La gestion des superpositions est un problème dit NP-complet [MARKS 91]. Pour traiter cela, nous définissons une fonction booléenne.

Fonction booléenne de superposition

En caractérisant chaque mot par son enveloppe, nous définissons une valeur booléenne qui vaut un si deux enveloppes se superposent, sinon zéro. Pour inclure la gestion de la proximité des écritures, l'enveloppe est dilatée selon un coefficient de proximité.

La fonction de coût de conflit est une fonction à M variables où M correspond au nombre de mots total que contient l'ensemble des objets linéaires. Pour une sélection donnée, à savoir une position possible parmi les N écritures, pour chaque portion, nous calculons la fonction de conflit. Si elle est égale à zéro, aucun conflit n'existe.

Fonction de coût global

Pour tenir compte de la qualité intrinsèque de chaque écriture, de la répartition inter-itérations de chaque objet linéaire et de la fonction de conflit, ces trois critères sont à leur tour intégrés dans une fonction quadratique pondérée ou la fonction de conflit est très fortement pondérée, puis la qualité intrinsèque de chaque écriture et enfin celle de l'écart inter-écritures.

La fonction de conflit différente de zéro n'est pas réhibitoire car il se peut qu'un réseau trop dense n'est pas de solutions sans conflit. Dans ce cas, une correction interactive, dans un premier temps devra succéder au processus automatique.

Minimisation par recuit simulé

Cette fonction de coût global est très complexe, possédant des variables booléennes, discrètes ou continues. Un optimum global ne peut être trouvée par les méthodes classiques d'optimisation. C'est pourquoi le recuit simulé, une méthode statistique de recherche, est utilisée car son utilisation sur positionnement des écritures horizontales et sur les numéros de routes est très satisfaisante.

Conclusion et perspectives

Cet article rappelle le processus général de positionnement automatique développé par le laboratoire COGIT et se concentre sur le traitement des écritures associées aux objets linéaires. Pour conclure, des résultats sur la recherche des meilleures positions possibles sont présentées ci dessous, ainsi que les évolutions à court et long termes.

Traitement en cours ... de traitement

La phase de conflits inter-écritures n'a pas encore été implémentée mais les tests sur le réseau hydrographique d'Amplepuis, incluant la recherche de la meilleure position possible, et respectant le fond de carte est déjà encourageant car ce réseau n'est pas dense et les risques de conflits inter-écritures quasi-nuls. A cause du tirage aléatoire, du traitement du fond de carte et du calcul des fermetures, le processus de recherche de positions possibles est beaucoup plus long que les autres écritures à positionner (quarante secondes en moyenne par écriture). Mais les tests effectués jusqu'à présent n'ont pas été optimisés. De toute façon, la recherche de positions possibles d'écritures courbées sera plus longue car les formes des écritures sont plus complexes et ne peuvent être ramenées à de simples rectangles.

Finition du traitement global

Les travaux s'orientent à court terme sur la conclusion du développement du processus global, à savoir l'intégration du découpage en portions et la gestion des conflits. Ces deux parties ont déjà été testées sur les écritures à position et sur les numéros de routes et ne risquent pas d'entacher les résultats. Le risque principal est l'augmentation de la durée du processus.

Une qualité sûre à cent pour cent ne peut être promise. Si la contrepartie du gain de temps n'est pas assurée, nous pouvons nous poser la question de l'intérêt d'un tel processus.

La réponse est l'intégration du placement des objets linéaires dans le placement automatique simultané de toutes les écritures.

Jusqu'à présent, les différents types d'écritures sont positionnés par étapes, les écritures ponctuelles d'abord. Elles deviennent alors une partie du fond de carte et génère des valeurs interdites de la matrice. Ce positionnement par étapes peut gêner voire empêcher le positionnement d'une écriture à disposition alors qu'il aurait suffi de déplacer l'écriture horizontale gênante.

Intégration d'une meilleure mesure de proximité des écritures

Dans les orientations à suivre, un aspect qui doit être développé est la modification de la mesure de proximité des écritures.

Jusqu'à présent, elle se mesure par la fonction booléenne de conflits des enveloppes dilatées. Mais l'un des principes généraux insiste sur la répartition homogène des écritures.

La mesure booléenne proposée ne prend pas en compte ce critère. Une fonction discrète ou continue de proximité des écritures, qui tiendrait compte de l'orientation des écritures et des différentes tailles de police, doit être définie pour pouvoir gérer le critère d'homogénéisation et à terme permettre de proposer l'insertion possible de nouvelles écritures dans les zones trop peu représentées en écriture. Nous obtiendrions alors un processus total.

Processus total

La première étape serait le positionnement de toutes les écritures en même temps, avec le critère de proximité, offerte à l'utilisateur. Une correction interactive serait alors proposée pour les positions finales en conflits.

Puis, les zones satisfaisantes mais trop denses seraient mises en exergue à l'utilisateur.

Enfin, l'utilisateur traiterait le cas des zones vides en proposant le positionnement d'écritures d'objets non sélectionnés à l'étape initiale. Un traitement local ou un nouveau processus total serait lancé.

D'autres positionnements

Parallèlement à cette recherche s'effectue, au laboratoire COGIT le positionnement des noms de rues qui est un problème à part car le réseau est extrêmement dense et les positions possibles très rares à cause des conflits et de la taille des objets.

La plupart du temps, les règles proposées ci dessus ne peuvent être exploitées et de nouvelles doivent être proposées comme les abréviations, ou un positionnement par trait de rappel lors de la gestion des conflits.

De même, des stages ont été effectués, parallèlement à ces recherches, afin d'optimiser les travaux sur le positionnement des écritures à position et de gérer les cas particuliers, comme le positionnement sur des cartes à très petites échelles ou l'intégration de positionnement automatique d'écritures associées à des blasons (voir article C.3.6).

Publications

[BARRAULT 95a] M. Barrault : *An Automated System for Linear Feature Name Placement which Complies with Cartographic Quality Criteria*, AutoCarto12, pp. 321-330, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950005/S-COM, mars 1995.

[BARRAULT 95b] M. Barrault : *Une méthode de placement automatique des toponymes des objets linéaires avec une qualité cartographique*, ACI, Barcelone (E), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950018/S-COM, septembre 1995.

Références

[ALINHAC 64] G. Alinhac : *Cartographie théorique et technique*, in fascicule 1, chap. 4, IGN, 1964.

[IMHOF 75] E. Imhof : *Positioning Names on Maps*, The American Cartographer, vol. 2, pp. 128-144, 1975.

[LECORDIX et al 94] F. Lecordix, C. Plazanet, F. Chirié, JPh. Lagrange, T. Banel, & Y. Cras : *Automated name placement on map under high quality cartographic constraints*, EGIS'94, vol. 1, pp. 22-32, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940019/S-COM, 1994.

[MARKS 91] J. Marks & S. Shieber : *The computational complexity of cartographic label placement*, technical report TR-05-91, Harvard CS, 1991.

[MARROT 94] JM. Marrot : *Positionnement automatique des kilométrages*, rapport de DESS, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940041/S-STA, juin 1994.

[MUSTIÈRE 95] S. Mustière : *Mesures de la qualité de la généralisation du linéaire*, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950044/S-STA, septembre 1995.

[PLAZANET96] C. Plazanet : *Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique*, rapport de thèse, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 960017/S-THE, octobre 1996.

[SCHMITT 93] M. Schmitt & J. Mattioli : *Morphologie Mathématique*, Editions Masson, 1993.

B.7 Caricature des virages par lissage de la courbure

Emmanuel Fritsch

Introduction

Dans le cadre de projet de rédaction de cartes à partir de données numériques, on se heurte actuellement à de nombreux problèmes de généralisation.

Pour les résoudre, on passe aujourd'hui par un traitement manuel, pour lequel la forme numérique des données est plutôt un désavantage : redessiner un objet au crayon est plus rapide que de le faire point par point à la souris. L'énorme coût des tâches de généralisation entraîne d'autre part une forte pression, pour une baisse de la qualité des produits cartographiques.

En effet, pour réduire les traitements, on a tendance à modifier les symboles utilisés. Ainsi, si l'on réduit l'épaisseur des symboles, le nombre de cas de superposition des objets de la carte diminue. Mais on va aussi affaiblir la lisibilité, et donc la qualité de la carte.

Aussi l'automatisation de la généralisation est-il un enjeu important dans le cadre de l'exploitation des données numériques de l'IGN, en particulier celle de la BDTOPPO et de la BDCARTO.

Parmi les problèmes qui se posent, ceux qui concernent le linéaire routier peuvent paraître comme les plus intéressants à automatiser. En effet, le linéaire routier est traditionnellement habillé d'un symbole relativement épais, qui peut donner des conflits et des superpositions au sein même d'un objet.

D'autre part, le thème routier est en nombre d'objets l'un des plus importants de la carte, et ce d'autant plus que l'on avance dans la réduction d'échelle.

Nous nous intéressons dans cet article au problème de la caricature des virages trop serrés : là où le rayon de courbure des virages est trop faible, le ruban du réseau routier se recouvre lui-même. Il y a conflit, et pour le résoudre, il faut exagérer la taille du virage pour assurer sa lisibilité.

On parle alors d'opération de caricature. Nous avons développé pour cela une série d'algorithmes, basés sur le lissage gaussien de la courbure.

La courbure est un très bon indicateur des détails importants d'un arc routier, puisqu'elle prend ses plus fortes valeurs sur les zones de virages serrés, c'est-à-dire là où il y a le plus de risques de voir naître des conflits.

La courbure connaît déjà plusieurs utilisations pour la conception d'algorithmes de généralisation [LOWE 88], [FRITSCH, LAGRANGE 95].

Après avoir élargi les virages trop serrés, nous nous intéresserons au recalage de la courbe nécessaire à la continuité du réseau routier. Nous présentons plusieurs méthodes de recalage, discutant les intérêts et les défauts de chacun.

La caricature par lissage de la courbure

L'élargissement de virage

La procédure de lissage des courbures utilisée par Mathieu Barrault [BARRAULT 97] pour définir numériquement la courbure des polygones peut servir aussi à la caricature des virages.

En effet, le lissage gaussien a pour effet de diminuer la valeur absolue des extrema de courbure, et de le faire d'autant plus que le paramètre de la courbure est élevé [BABAUD et al 86]. Or la valeur absolue de la courbure est l'inverse du rayon de courbure de la courbe, et les extrema de cette courbure correspondent aux virages les plus serrés.

Le lissage gaussien de la courbure va donc augmenter le rayon de courbure des virages les plus serrés, d'autant plus que le paramètre de lissage sera élevé.

Ainsi le lissage gaussien de la courbure peut avoir deux applications différentes, selon la valeur du paramètre :

- dans le but initial de définir la courbure d'une polygone, une faible valeur du paramètre est nécessaire,
- pour obtenir une caricature des épingles à cheveux, un paramètre plus élevé sera utilisé.

Dans le premier cas, il faut que l'ordre de grandeur du paramètre soit équivalent ou inférieur à la résolution de l'échelle initiale.

Dans le second cas nous allons montrer maintenant que le choix du paramètre contraint directement une valeur minimale du rayon de courbure de la courbe généralisée.

Le rayon de courbure minimal

Nous allons montrer dans ce paragraphe que l'arc routier reconstruit à partir de la courbure lissée présente une courbure maximale, c'est-à-dire un rayon de courbure minimal, dépendant uniquement du paramètre de lissage.

Cette propriété est intéressante, car en fixant le paramètre de lissage de telle sorte que le rayon de courbure minimal garanti soit égale ou proche de la demi-largeur du symbole, on assurera la lisibilité des virages les plus serrés.

Cette propriété de rayon minimal de la courbure n'est pas vérifiée pour un arc quelconque. On peut toujours trouver un arc géométrique dont la courbure, après lissage, sera supérieure à n'importe quel seuil donné.

Toutefois, dans le cas qui nous occupe, nous pouvons assurer l'existence d'un maxima des valeurs des courbures lissées, grâce à deux propriétés géométriques des arcs routiers :

— dans les données initiales, le tracé de la route présente un rayon de courbure minimal, et ce quelle que soit l'origine de ces données : si ce sont des données topographiques, ce rayon minimal sera donné par la demi-largeur de la route sur le terrain. Si les données initiales sont déjà généralisées, le rayon minimal est voisin de la demi-largeur du symbole qui les habille,

— les déviations angulaires entre deux points de la routes sont presque toujours inférieures à 360°. En effet, une route, instrument de communication, tend à relier deux points par un chemin aussi simple que possible, et n'a donc pas tendance à faire des boucles.

En fait, même en zone de montagne, on dépasse rarement les 180°. De rares exceptions interviennent sur certains types de relief, (puy de Dôme), sur des ouvrages d'art (les échangeurs routiers).

On peut citer aussi les rampes d'accès de parking, bien que l'exemple relève alors moins de la cartographie que de la modélisation 3-D.

On remarquera toutefois que dans les trois cas, l'impératif de progression planimétrique a été remplacé par un impératif de progression altimétrique. De toute façon, ces cas demeurent relativement rares.

Sous la contrainte de ces deux hypothèses, et si l'on nomme R le rayon minimal à assurer pour tous les arcs dans la représentation généralisée, et η le rapport de changement d'échelle, alors on a un paramètre de lissage σ , garantissant la lisibilité :

$$\sigma = \frac{A \cdot R}{\sqrt{\pi}} \sqrt{1 - \eta^2}$$

Nous avons ainsi déterminé le paramètre du lissage qu'il faut utiliser pour assurer un rayon de courbure minimal aux arcs généralisés.

Le recalage des courbures lissées

Pour qu'il soit envisageable d'effectuer la généralisation d'une courbe sur sa courbure, il faut que la reconstruction de la courbe soit possible à partir de la courbure généralisée.

La généralisation que nous pouvons effectuer sur la courbure aura beau améliorer la lisibilité des virages, elle ne sert à rien si la cohérence topologique est perdue.

Or le traitement sur la courbure se fait indépendamment de la localisation de l'arc traité.

L'arc est déformé, et le segment qui joint les deux extrémités -ou segment de base- est modifié tant en longueur qu'en orientation.

Donc pour que la méthode d'élargissement des virages par lissage de la courbure soit utilisable en généralisation, il faut mettre en place des procédures de recalage de la courbe généralisée afin d'assurer la continuité du réseau routier.

Pour cela nous allons considérer différentes classes de transformations du plan sur lui même.

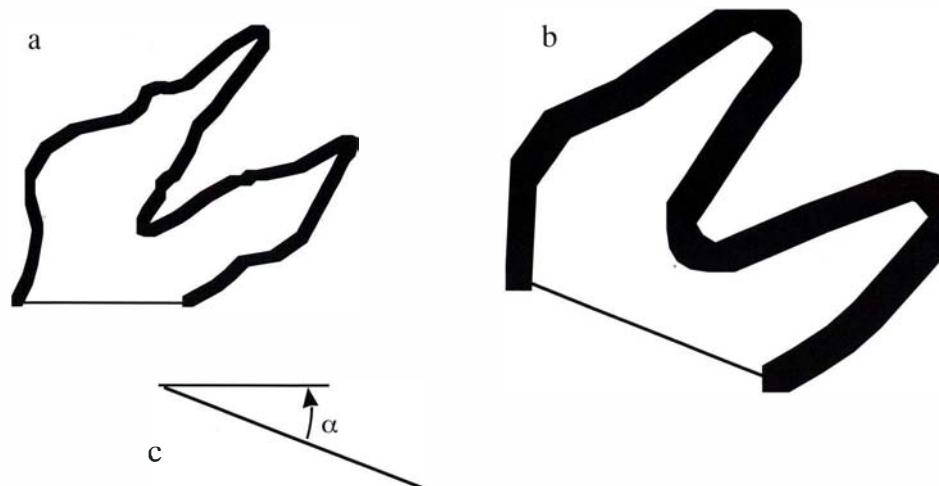


figure B.7.1

La figure illustre le problème du recalage : la figure B.7.1-a présente un arc, la figure B.7.1-b est la reconstruction de l'arc après lissage de sa courbure. L'élargissement des virages induit une déformation de la courbe, et donc du segment de base. La différence entre les deux segments est visualisée sur la figure B.7.1-c.

Similitudes

La première transformation que nous allons utiliser est la similitude. Les similitudes sont les transformations du plan engendrées par composition de rotations et d'homothéties.

Pour une paire de segments donnés, il existe une et une seule similitude par laquelle le second segment soit l'image du premier. Nous définissons ainsi, à partir des deux segments de base, une similitude qui assure le recalage des points extrémités et la cohérence topologique du réseau.

Tests

Nous avons testé cette méthode sur un échantillon de routes de montagne issu de la BDCARTO, couvrant une demi-feuille sur le département de la Savoie.

L'aspect général des arcs est amélioré par le lissage gaussien de la courbure. La plupart des virages très serrés voient leur lisibilité augmenter.

À ce titre, le lissage gaussien de la courbure est une bonne opération de caricature. Néanmoins, plusieurs défauts apparaissent.

Le plus important est un raccourcissement des épingles à cheveux. Ce raccourcissement est inégal selon les arcs, mais il augmente :

- avec le paramètre du lissage utilisé,
- avec l'amplitude des virages déformés,
- à l'inverse de la longueur du segment de base.

De fait, dès que l'on traite des routes à fortes sinuosités, l'élargissement des virages va induire un allongement du segment de base de l'arc.

Plus le changement d'échelle est important, plus cet allongement sera conséquent; le rapport de la similitude assurant le recalage sera alors suffisamment inférieur à un pour que les détails de l'arc soient sensiblement amoindris.

Parmi eux, les branches des épingles à cheveux, qui sont les formes caractéristiques les plus étendues, sont systématiquement tronquées.

De plus, plus le segment de base est court, plus le recalage est sensible aux petites variations de position. De là vient le défaut que l'on constate sur les essais.

Afin de tenter d'y remédier, nous allons développer d'autres procédés de recalage.

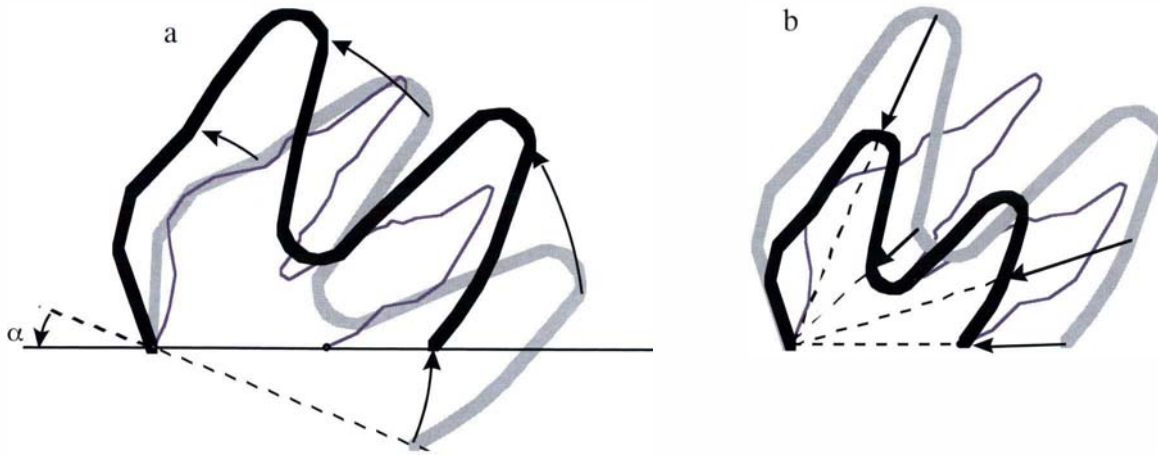


figure B.7.2

La similitude de recalage de l'arc de la figure B.7.1 est décomposée sur cette figure en une rotation (figure B.7.2-a) et une homothétie (figure B.7.2-b). Le trait fort représente la courbe produite par la transformation, le trait grisé habille la courbe avant transformation, et le trait fin est la trace de l'arc originale, donné pour comparaison.

La figure B.7.2 montre la décomposition de la similitude en rotation et homothétie. Dans les procédés de recalage que nous allons développer maintenant, nous réutiliserons toujours cette rotation.

Elle permet en effet de faire coïncider les bases des deux arcs, sans aucune modification du traitement de généralisation effectué par le lissage de la courbure.

La rotation n'ayant aucune incidence sur la géométrie de la ligne, c'est l'homothétie qui introduit les déformations inacceptables, et c'est elle que nous allons maintenant essayer de remplacer par d'autres transformations plus complexes.

Affinités orthogonales et obliques

Les affinités, présentation géométrique

Comme la similitude altère le message cartographique en réduisant la taille de l'arc uniformément sur toutes les directions, il a semblé intéressant d'utiliser une autre classe de transformations géométriques simples qui permettent de comprimer juste selon une direction en gardant une autre invariante : les affinités.

Une affinité se définit dans le plan par la donnée de deux axes D1 et D2 non colinéaires, affecté chacun d'un coefficient (k_1 et k_2).

Si \underline{u} est un vecteur du plan, se décomposant en $\underline{u} = \underline{u}_1 + \underline{u}_2$ sur les deux axes, alors l'image de \underline{u} par l'affinité est :

$$\underline{v} = k_1 \cdot \underline{u}_1 + k_2 \cdot \underline{u}_2$$

Avant d'appliquer les affinités à notre problème de recalage, nous avons d'abord assuré la concordance des segments de base des deux arcs au moyen d'une rotation, la même que celle employée pour composer la similitude.

De fait, la composition de cette rotation avec les affinités revient à travailler dans l'espace des applications linéaires directes du plan.

L'intérêt des affinités sur les similitudes est de découpler la direction de compression, nécessaire au recalage, d'une autre direction, soit orthogonale, soit définie par la direction principale de la ligne.

Le long de cette seconde direction, pour supprimer les déformations, on imposera un taux de compression nul, i.e. $k_2 = 1$.

Ainsi, l'on espère au moins maintenir les détails dont la plus grande extension ne se trouve pas parallèle au segment de base.

L'affinité orthogonale

Dans ce paragraphe, nous prendrons pour direction invariante l'orthogonale au segment de base (fig. 7.3-a).

Ce choix s'impose à ce stade pour des raisons de symétrie : sans information supplémentaire sur la géométrie de l'arc, tout autre choix serait purement arbitraire.

Tests

Les essais menés avec cette méthode montrent que si les longueurs des virages sont dans l'ensemble mieux respectées avec cette méthode qu'avec la précédente, les orientations des épingles à chevaux sont parfois fortement modifiées.

En fait, les deux axes définissant l'affinité sont les deux seules directions invariantes de la transformation, dès que les coefficients de l'affinité sont différents. Il n'est donc pas étonnant de constater une altération des directions des épingles à chevaux.

Mais cette altération est difficilement tolérable. En effet, les épingles à chevaux servent à faire gagner de l'altitude à la route. La pente doit en être continue et relativement faible, ce qui se manifeste sur la carte par un angle d'incidence faible et constant entre les lignes de niveau et la route.

Si l'on change l'orientation de la route, celle-ci va couper les lignes de niveau avec une incidence beaucoup plus importante, et l'altimétrie de la route pourra sembler très étrange : un véhicule circulant sur une telle route monterait et descendrait alternativement entre chaque épingle à chevaux.

D'autre part, l'orientation d'un tracé est un élément relativement important dans la perception de celui-ci. Même sur une carte sans courbes de niveau, la modification des orientations est difficilement supportable.

Ainsi l'orientation des virages est-elle une composante essentielle du message cartographique, et nous allons essayer de mieux tirer profit des possibilités des affinités afin d'améliorer la prise en compte de cet impératif.

En effet, l'axe d'invariance de l'affinité a été choisi orthogonal au segment de base, parce qu'ainsi sont définies les affinités les plus utilisées, mais aussi parce que c'est ainsi qu'en théorie on assure une déformation géométrique minimale : plus les deux axes sont proches et plus les déformations sont importantes.

En prenant une autre direction que la direction orthogonale, nous aurons théoriquement des déformations plus importantes.

Néanmoins, si l'axe d'invariance est choisi de façon judicieuse, ces déformations ne s'appliqueront pas aux détails importants de la courbe.

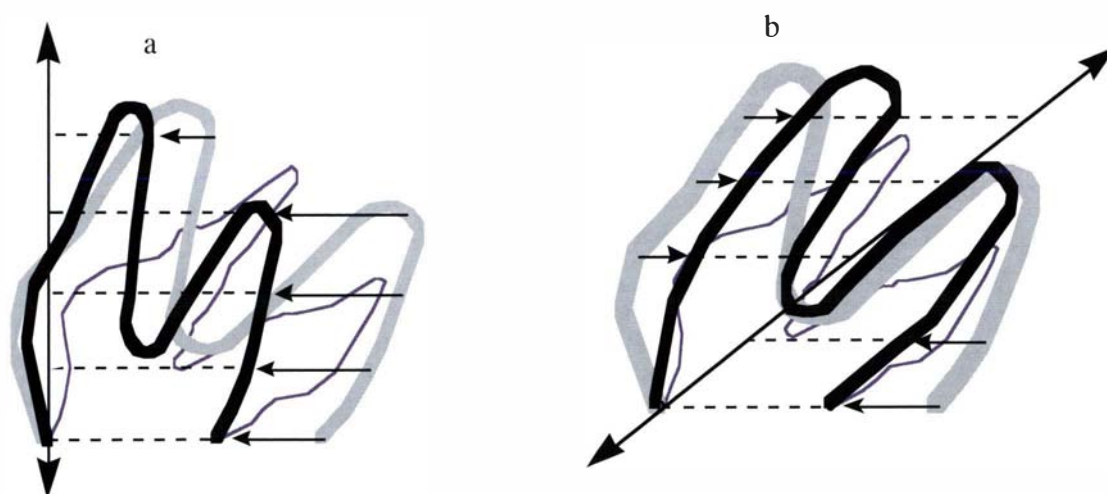


figure B.7.3

La courbe en grisé représente l'arc dont la courbure a été lissée, puis qui a subi la rotation définie par la figure B.7.2-a. C'est sur cet arc que l'on va faire agir les affinités. La figure B.7.3-a présente l'affinité orthogonale, et la figure B.7.3-b présente une affinité oblique. L'axe d'invariance de cette dernière a été choisi parallèle aux épingles à chevaux de l'arc traité.

Les affinités obliques

Pour fixer une direction invariante plus intéressante que la direction orthogonale, il nous faut donc composer avec deux exigences :

- si la direction invariante est la direction orthogonale, les orientations sont faussées,
- mais si la direction invariante est trop proche de celle du segment de base, les déformations géométriques seront très importantes.

La direction invariante que nous allons fixer doit donc être intermédiaire entre l'orthogonale au segment de base

et la direction privilégiée des détails de la courbe.

La difficulté qui apparaît maintenant est la définition de cette direction privilégiée.

On conçoit intuitivement ce que représente la direction privilégiée d'une épingle à cheveux : c'est l'axe de symétrie de ce virage.

La direction d'un ensemble de virages hétérogènes, est plus difficile à définir, mais reste sensible à l'intuition.

Dans le cas d'un arc quelconque, cette direction ne sera pas toujours définie (certains arcs ont un tracé sans aucune organisation), par exemple un trajet bouclant sur un cercle n'a pas de direction privilégiée, alors que sur une ellipse, la direction privilégiée est le grand axe de l'ellipse, et ce d'autant plus que l'excentricité de l'ellipse est grande.

Ainsi, si la notion de direction privilégiée d'un arc semble facilement accessible à notre intuition, sa définition mathématique n'est pas immédiate. En particulier cette direction privilégiée n'a rien à voir avec la sommation des orientations.

En effet, deux segments de sens opposés doivent concourir dans le même sens à la définition de la direction, alors que leurs orientations sont opposées : la somme des vecteurs constituant un arc donne la direction du segment de base, et ce quelle que soit la forme que peut prendre l'arc.

En particulier les composantes de la branche afférente à une épingle à cheveux seront annulées par les composantes de l'autre branche.

Nous proposons maintenant une méthode de définition de la direction moyenne d'une courbe.

Cette méthode ne prétend pas être unique. D'autres méthodes pourraient peut-être se révéler utiles, par exemple la "distance direction matrix" proposée par [MCMASTER 83], ou le code de Freeman [FREEMAN 74].

Néanmoins, celle que nous proposons ici semble plus robuste et plus directement adaptée à nos vues.

Puisque sommer des vecteurs du plan revient à travailler sur des orientations entre 0 et 360°, c'est à dire dans $\mathbf{R}/2\pi\mathbf{Z}$, et que nous voulons travailler sur des directions, entre 0 et 180°, c'est-à-dire sur $\mathbf{R}/\pi\mathbf{Z}$, nous allons introduire une factorisation du plan P.

Pour le formalisme de la démonstration, et puis que nous travaillons sur des angles, nous représenterons le plan P par l'ensemble des nombres complexes C.

Soit O la relation d'équivalence sur C définie par :

$$x \text{ O } y \iff (x = y \text{ ou } x = -y).$$

Alors, appelons D l'ensemble des classe de O dans C : $D = C / O$. Pour un nombre complexe z quelconque, nous définirons sa classe dans D par $O(z)$. On peut alors définir sur D une loi de composition par :

$$O(r \cdot e^{i\theta}) \oplus O(r' \cdot e^{i\theta'}) = O(r \cdot e^{2i\theta} + r' \cdot e^{2i\theta'})$$

On vérifie aisément que cette loi confère à D une structure de groupe. En fait, D est isomorphe à C. On a même un isomorphisme canonique qui conserve la structure de corps :

$$f: \begin{matrix} D \rightarrow C \\ O(r \cdot e^{i\theta}) \rightarrow r \cdot e^{2i\theta} \end{matrix}$$

(cet isomorphisme est une extension de l'isomorphisme canonique entre $\mathbf{R}/2\pi\mathbf{Z}$, et $\mathbf{R}/\pi\mathbf{Z}$)

Dans ce groupe, nous avons réalisé notre programme, c'est à dire que des éléments opposés, i.e. qui s'annulent lorsqu'on les somme dans C, vont s'additionner dans D.

D'un point de vue technique, nous allons considérer les différents segments constituant la polyligne, les décomposer en arguments θ et module r , et effectuer la somme au fil de la ligne des termes $z = r \cdot e^{2i\theta}$.

Nous décomposons ensuite la somme totale en $Z = R \cdot e^{2i\Theta}$, où Θ est l'angle de la direction privilégiée, définie bien sûr à π près. R est un indicateur de la fiabilité de la mesure : plus R est élevé, et plus la direction détectée est révélatrice d'une direction réellement privilégiée.

Pour rendre cet indicateur plus pertinent, nous pouvons le normaliser, et définir ainsi $I = R/L$, avec L la longueur de la courbe.

Par définition de R , nous avons $I \in [0,1]$.

Nous avons ainsi défini la direction moyenne d'un arc. Il nous faut maintenant l'adapter à notre algorithme, pour prendre en compte le problème des déformations géométriques.

En effet, on l'a vu, si la direction privilégiée est proche de l'orthogonale, les déformations géométriques minimales autorisent l'utilisation de cette direction comme axe invariant.

A contrario, si la direction privilégiée est voisine de la direction du segment de base, les déformations étant bien plus importantes, on tâchera de prendre comme axe invariant une direction plus fortement incidente au segment de base.

Pour cela, en reprenant les notations définies ci-dessus, et en notant $e_B = R_B \cdot e^{2i\Theta_B}$ le nombre complexe image du segment de base par f , on prendra $Z' = Z - e_B$. L'argument de Z' donne la direction privilégiée modifiée, qui présente plusieurs propriétés :

- la direction privilégiée modifiée fait un angle d'au minimum quarante cinq degrés avec le segment de base (si l'on souhaite un angle minimal différent, on fixe : $Z' = Z - e_B \cdot \text{tg}\alpha$. Cet angle α pourrait constituer un paramètre supplémentaire de l'algorithme. Il en complique le maniement, et nous ne l'avons pas retenu),
- elle est comprise entre l'orthogonale au segment de base et la direction privilégiée initiale. Elle réalise ainsi un compromis entre la déformation minimale et la préservation de l'orientation des détails de l'arc,
- plus I est important, moins la modification apportée à la direction privilégiée sera importante. Inversement, si I est très faible, i.e. si la direction privilégiée n'est pas très représentative, elle comptera peu dans le calcul de l'axe invariant, qui sera très proche de l'orthogonal.

Le compromis entre l'orthogonale et la direction privilégiée est donc pondéré par la valeur de I . C'est cette direction que nous allons donc utiliser comme axe invariant de l'affinité.

Tests

Comparés aux résultats du recalage par affinité orthogonale, ceux de l'affinité oblique avec détection de la direction privilégiée sont généralement meilleurs. Le rétablissement des orientations des virages est bien effectué. Néanmoins, plusieurs défauts demeurent.

En particulier la localisation des détails cartographiés n'est pas vraiment assurée. Si les points extrémités sont replacés avec exactitude, les autres parties de la courbe peuvent subir des dérives importantes.

On constate ainsi que certains virages sont très loin, après le recalage, de leur position nominale. Ce défaut, très important sur les résultats de recalage par affinités, était déjà présent sur les résultats de recalage par similitude.

Mais le reproche principal que l'on puisse faire aux différentes méthodes de recalage présentées jusqu'ici est de ne pas respecter les rayons de courbures que la méthode des lissages avait permis de garantir.

En effet, l'élargissement des virages induit systématiquement un allongement du segment de base. Les recalages uniformément répartis sur la ligne induisent donc une compression de cette dernière, ce qui diminue les rayons de courbures des virages, et mange en partie le gain du lissage.

Cette diminution des rayons de courbures est relative, mais elle dépend fortement de la forme de la ligne, et n'est absolument pas contrôlable, c'est-à-dire qu'il ne semble pas possible de déterminer *a priori* sur un arc de combien il faudrait exagérer le lissage de la courbure pour garantir *après le recalage* un rayon de courbure donné - et ce quel que soit la méthode de recalage utilisée parmi les trois déjà définies.

Une solution envisagée un temps fut de mesurer *a posteriori* la réduction de courbure, et d'itérer plusieurs fois le processus (lissage+recalage) jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant.

Le calage plâtre

Nous avons vu que les recalages développés jusqu'ici ne permettent pas de conserver le rayon de courbure minimale que nous avons introduit au premier paragraphe.

Les similitudes comme les affinités ont tendance à réduire le rayon de courbure des épingles à cheveux.

Pour préserver ce rayon de courbure minimal, il fallait développer une transformation qui effectuât les amortissements sur les parties de faible courbure, sans déformer les parties de fortes courbures.

D'autre part, les algorithmes précédents n'assuraient pas la localisation des points caractéristiques sur les arcs généralisés.

Pour remédier à ces deux défauts, nous avons mis au point un algorithme de déplacement par morceaux.

Le principe est de déplacer dans un premier temps les parties de fortes courbures qu'il faut recaler sans en modifier la forme (on bloque ses formes comme un plâtre bloque un membre pour consolider une fracture, de là le nom donné à l'algorithme) et ensuite seulement les parties de courbures plus faibles, sur lesquelles on peut ainsi effectuer les amortissements de déplacement nécessaires au raccordement des arcs.

Plus précisément (voir aussi figure B.7.4), notre algorithme isole sur la ligne les morceaux dont la courbure est supérieure à un seuil donné (proche de la limite théorique de courbure définie précédemment).

Pour chacun des morceaux ainsi détectés, on calcule alors les barycentres, sur la courbe originale et sur la courbe reconstruite après lissage des courbures.

Le vecteur défini par ces deux barycentres détermine la translation que l'on applique à chacun des points du morceau à recaler.

Les parties de forte courbure sont ainsi recalées indépendamment les unes des autres sur leurs positions initiales, et la forme de chacune est conservée par translation.

Naturellement, les extrémités de l'arc sont aussi recalées lors de cette première phase, sous la forme d'éléments ponctuels.

Ensuite, on effectue les déplacements des parties de courbure plus faible en amortissant les différences de déplacements entre les parties déjà placées.

L'amortissement du déplacement se fait linéairement selon l'abscisse curviligne.

Tests

Les résultats de cet algorithme sont relativement différents des précédents. Le contrôle obtenu tant sur les rayons des virages que sur la localisation et l'orientation des détails principaux permet de compter sur une généralisation plus sûre et plus homogène.

Néanmoins, deux défauts apparaissent :

— si deux épingles à cheveux se suivent sans laisser entre elles une branche suffisamment longue, on voit apparaître sur les résultats un décrochement assez inesthétique. Les deux virages sont recalés indépendamment l'un de l'autre. Le déplacement des branches de l'un à l'autre ne peut pas être amorti, car il n'y a pas assez d'espace pour cela,

— l'algorithme n'effectue qu'un élargissement de chacun des virages. L'amélioration de lisibilité obtenue est relative uniquement à la courbure trop élevée des données initiales.

En particulier les conflits par superposition de deux portions de route qui ne sont pas contiguës selon l'abscisse curviligne, ne sont pas traités par l'algorithme, et les résultats sont alors plutôt moins bons que ceux des recalages précédents, qui autorisent des déplacements des virages.

De fait, ces cas réclament une dilatation, et il faut utiliser un autre algorithme, par exemple l'accordéon [PLAZANET 96] ou la modélisation mécanique [FRITSCH 96].

Si vraiment la congestion de la zone est trop forte, il faudra procéder à l'élimination d'une partie des détails.

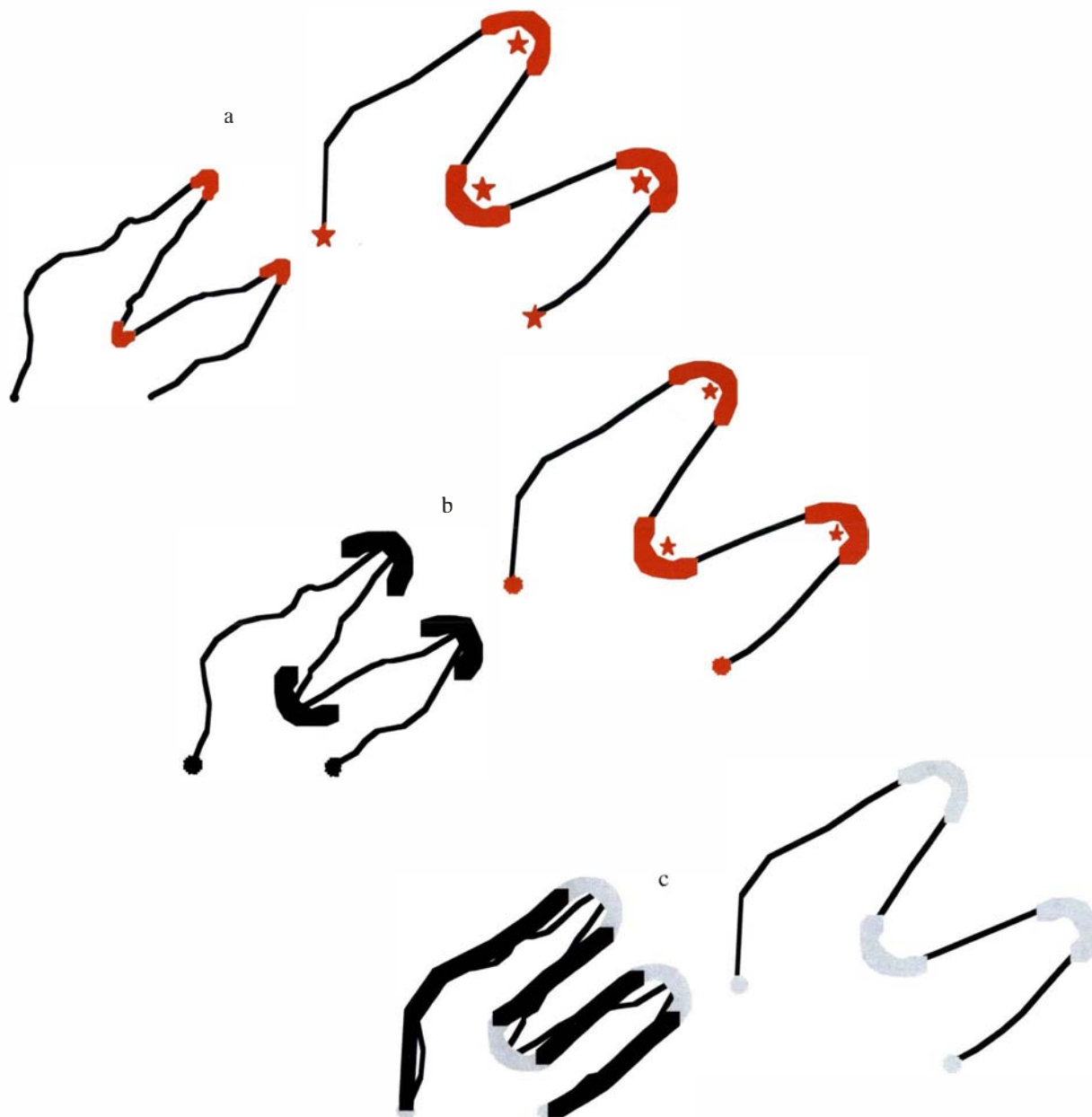


figure B.7.4

Le recalage plâtre est représenté ici en trois étapes : on détecte d'abord les zones de fortes courbures, en rouge sur la figure B.7.4-a, afin de les recaler indépendamment les unes des autres (figure B.7.4-b), et sans les déformer. Ensuite, on recale les parties moins courbées, qui sont a priori susceptibles d'être déformées pour amortir les déplacements (figure B.7.4-c)

Conclusion

L'algorithme de lissage des courbures assure une bonne amélioration de la lisibilité des virages. Le bruit sur la courbe est lissé, donnant à l'arc un aspect moins irrégulier.

Le problème du recalage, traité de diverses manières, trouve une solution relativement intéressante avec la méthode "plâtre".

Le principal avantage de cette méthode est son ergonomie : la tâche qu'il accomplit est clair (élargissement des virages), et le choix du paramètre unique est contraint par la largeur de l'arc dans la carte généralisée. C'est donc un algorithme relativement simple.

On pourrait ainsi envisager de l'appliquer de façon systématique sur tous les arcs, en prétraitement, lors de la généralisation d'une zone de montagne.

Pour rendre cette possibilité intéressante, il faudrait être capable de valider le résultat fourni, c'est à dire de détecter les cas d'erreurs pour proposer en aval une reprise à l'opérateur.

D'autre part, il manque actuellement une gestion des carrefours et des croisements, sur lesquels apparaissent un grand nombre de conflits.

Enfin, il faudrait pouvoir répercuter sur les autres thèmes les déplacements créés par le routier.

Les recalages fondés sur similitude et affinités présentent des résultats beaucoup plus contrastés. On peut envisager néanmoins leur utilisation dans un processus de généralisation assisté, ou comme outil d'une plate-forme d'automatisation de la généralisation par apprentissage supervisé.

Références

[BABAUD et al 86] J.Babaud, A. Witkin, M. Baudin & R. Duda : *Uniqueness of the gaussian Kernel for Scale-Space Filtering*, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Image Processing, vol. 8, n° 1, p 26-33, 1986.

[BARRAULT 97] M. Barrault : *Placement automatique des écritures du linéaire*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 68, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 1997.

[FREEMAN 74] H. Freeman : *Computer processing of line drawing images*, Comput surveys, vol. 6, 1974.

[LOWE 88] DG. Lowe : *Organisation of smooth image curves at multiple scale*, International Conference on Computer Vision, p 558-567, 1986.

[MCMASTER 83] RB. McMaster : *Mathematical measures for the evaluation of simplified lines on maps*, rapport de thèse, Université du Kansas (USA), 1983.

[PLAZANET 96] C. Plazanet : *Enrichissement de bases de données géographiques*, rapport de thèse de Doctorat, Université de Marne la Vallée, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960017/S-THE, 1996.

Publications

[FRITSCH 96] E. Fritsch : *Mechanical approach of Generalisation*, GISRUK'96, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-9600 43/S-COM, 1996.

[FRITSCH, LAGRANGE 95] E. Fritsch & JPh. Lagrange : *Spectral representation of linear features for generalisation*, COSIT'95, p 157-171, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-950037/S-COM, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 1995.

B.8 Gestion du temps dans une base de données topographiques

Laurent Raynal

Introduction

Une base de données topographique est une base qui recense tous les éléments du paysage, qu'ils soient naturels (tels les rivières ou les montagnes) ou artificiels (tels les routes ou les bâtiments).

De par sa complétude, une base de données topographiques joue le rôle de référentiel, de repère quasi-universel pour toute étude localisée dans l'espace (étude d'aménagement du territoire, implantation de nouvelles infrastructures, aide à la navigation etc...).

L'IGN a en charge de produire et mettre à jour une telle base de données en France. Cependant, le paysage évoluant, l'IGN doit faire part de ces changements auprès de ses clients : soit en fournissant la base de données la plus à jour possible, soit en fournissant toutes les évolutions qui ont été enregistrées depuis la dernière livraison. La manipulation de données spatio-temporelles est donc incontournable.

D'autre part, la gestion de données spatio-temporelles est un domaine de recherche émergeant à l'heure actuelle [ARMSTRONG 88] [LANGRAN 92] [WORBOYS 94] [GEOINFO 95].

En effet, tout scientifique collecte des données dans différentes situations pour comprendre et expliquer les lois qui régissent les phénomènes, lois perçues généralement sous la forme de processus.

On peut citer en particulier l'action « Global Change » [NAS 90] [IGBP 90] dont le sujet majeur est de comprendre l'évolution des climats au niveau mondial stimulant les travaux sur la modélisation de processus spatio-temporels et la modélisation de données spatio-temporelles [BELLER et al 91].

Cependant, les modèles décrits ne semblent pas correspondre à la problématique d'un producteur de données topographiques, ne prenant pas en compte la nature des données topographiques.

Cet article tente donc de concilier les deux approches afin de proposer un modèle de données topographiques temporelles. Ce modèle sera décrit dans le contexte du projet COMMUTER.

Cet article suit donc la structure suivante : la première partie présente les besoins émanant du processus de mise à jour de données topographiques. Puis nous aborderons quelques modèles de données temporelles avant de décrire notre modèle de données spatio-temporelles et sa place dans le projet Commuter.

Enfin, la dernière partie conclura cet article et dégagera les voies de recherche actuelles.

Quels besoins pour la maintenance de bases de données topographiques ?

Maintenir une base de données topographiques, c'est à la fois organiser la mise à jour de la base de données mais aussi tenir compte du caractère temporel des données afin d'assurer une adéquation entre le modèle de notre base et l'évolution de l'univers qu'elle modélise. Abordons donc ces deux points.

Processus de mise à jour d'une base de données topographique

En considérant qu'une première version de la base de données est disponible (mais obsolète), la tâche essentielle d'un producteur de bases de données topographiques, consiste à collecter les nouvelles informations, à les intégrer (tout en assurant un niveau de qualité) puis à diffuser ces évolutions auprès des utilisateurs.

Collecter

En théorie, la saisie des mises à jour devrait être effectuée dès qu'un changement a été détecté, saisie « sur le champ ».

Cependant, cette procédure n'est guère possible à l'heure actuelle à la fois parce que les données topographiques représentent une quantité importante d'informations et parce qu'un travail de veille sur les évolutions du paysage engage beaucoup d'efforts humains et ne peut être complet.

Certaines évolutions peuvent être obtenues grâce aux procédures administratives (permis de construire, avant-projet d'autoroute, réduction d'un virage), documentation intéressante mais peu homogène graphiquement (échelles variables, degré de précision variable).

En effet, afin que la base conserve un niveau de qualité homogène, chaque document doit être exploité à partir d'un support graphique commun.

On introduit donc la notion de rythme de mise à jour où selon des considérations techniques, économiques et organisationnelles on déterminera qu'une nouvelle version de la base sera établie toutes les X années. Le rythme de mise à jour agit donc comme un filtre temporel sur le contenu de la base de données.

Régulièrement, on rassemblera tous les documents que l'on a pu récupérer et on les confrontera aux photos aériennes ou satellites afin de recouper les informations et également de détecter les informations non répertoriées dans la documentation (déplacement d'une lisière de forêt par exemple). Notons qu'une collaboration avec un acteur local (Communauté urbaine, Commune, Direction Départementale de l'Équipement) peut également accélérer un tel processus.

Intégrer-Valider

La deuxième tâche incombant au producteur consiste à contrôler l'ensemble de ces informations et à les intégrer dans la base de données. Cette activité de contrôle porte également sur la qualité intrinsèque de la base de données (justesse au niveau géométrique, topologique et sémantique).

On veillera à ce titre à ne pas avoir d'état incohérent pour la base de données (par exemple, si un regroupement de communes a lieu sans indiquer la nouvelle mairie, on trouvera dans la base une commune ayant plusieurs mairies).

Diffuser

Enfin, la dernière tâche est la diffusion des nouvelles données intégrées.

A ce titre, bien que toute diffusion des mises à jour nécessite un accord préalable entre client et producteur, il semble que deux types de diffusion sont à privilégier : le premier correspond à une livraison de la nouvelle base dans sa totalité (qui comme toute nouvelle version viendra « écraser » la précédente).

Le second correspond à une livraison des évolutions, c'est-à-dire la fourniture des changements entre les données livrées précédemment et la nouvelle version.

Cette deuxième forme de livraison inclut donc six types d'informations : les objets créés, les objets détruits, les objets modifiés géométriquement, les objets modifiés sémantiquement, les relations créées et les relations détruites.

Il faudra donc adapter les formats d'échanges pour diffuser ces types d'informations.

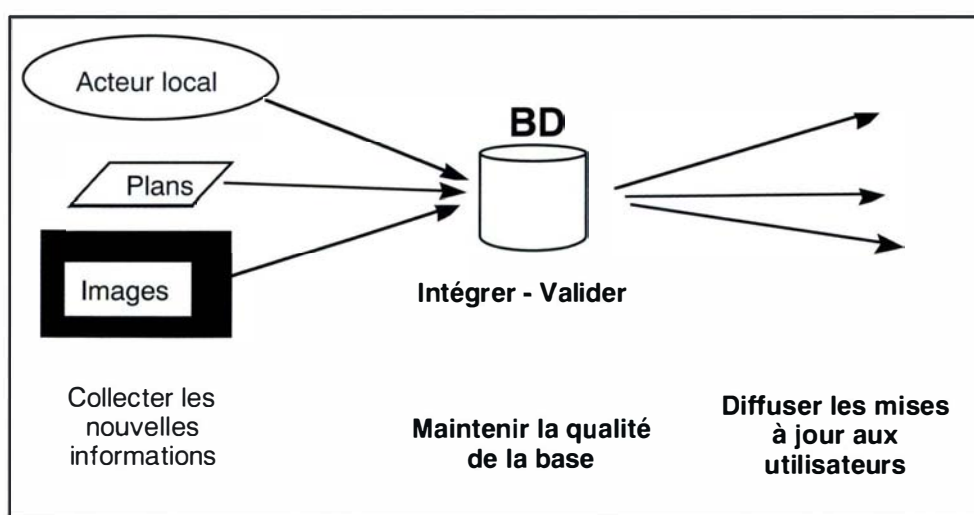


figure B.8.1 : processus de mise à jour

Le cycle de mise à jour est terminé. Il suffit d'archiver la dernière version de la base en attendant la prochaine mise à jour. Examinons maintenant les caractéristiques de données topographiques afin de retenir au mieux les évolutions constatées dans le paysage.

Données topographiques temporelles

Le premier caractère temporel des données topographiques concerne la relative stabilité de ces données dans le temps. Les quelques projets ou organismes ayant l'expérience de la mise à jour ont estimés ou constatés un taux de mise à jour de l'ordre de 1 à 10% par rapport à la totalité de la base [JOLIVET, RAYNAL 96] [COOTE, RACKHAM 92].

Même si ce volume ne doit pas être négligé au vu de la taille d'une base de données topographiques, ce constat nous permet d'écarter les modèles de données dynamiques ou actifs particulièrement destinés à la gestion d'objets mobiles (voitures, satellite, etc.).

Le rôle de référentiel dévolu à la base de données tend à préférer l'enregistrement de données pérennes au détriment de données plus fugitives.

La seconde remarque concerne les problèmes d'abstraction de l'espace et d'abstraction des changements.

En effet, suivant une description cartésienne de l'espace, la base de données topographiques décompose le paysage méthodiquement en un ensemble d'objets discernables décrits par leurs frontières (délimitation stricte des bords d'un objet que ce soit une maison, un lac, une rivière ou une forêt).

Or cette décomposition peut générer des conflits de représentation de l'espace.

Par exemple, lors de la création d'un lotissement, un topographe reportera l'emplacement des maisons, routes et autres limites visibles tandis qu'une personne du cadastre reportera un ensemble de parcelles.

Les actions de création des limites de parcelles et des limites topographiques même si elles sont partiellement confondues ne sont donc pas rigoureusement équivalentes.

De plus, si deux limites sont partagées, la modification de l'une des deux limites ne conduit pas nécessairement à un modification de l'autre limite.

Ainsi, la complexité des modifications géométriques et la diversité des interprétations conduit à choisir un ensemble restreint d'opérations dont la signification est sans équivoque (actions de création, de destruction, de modification de valeur d'attribut).

Enfin, le dernier point abordé, conséquence du point précédent, traite du problème d'identification des données géographiques.

En effet, si les données géographiques représentent la réalité, il faut maintenir une cohérence entre l'évolution des données géographiques et l'évolution des éléments de la réalité.

Or les données géographiques n'ont pas d'identifiant universel (cela dépend du contexte - cf les limites de parcelles et les limites topographiques).

Et l'un des moyens qui assure cette cohérence consiste à créer des relations historiques entre les objets. De la sorte, des relations de successions lieront un objet à son ou ses successeurs. De telles relations de successions seront systématiquement créées dans le cas d'opérations de fusion/scission de données.

Par exemple, si une forêt F1 est décrite par une surface, et si une route est construite traversant la forêt F1, l'ancienne forêt sera partagée entre deux forêts F2 et F3 (deux polygones).

Une relation de succession sera alors créée entre l'ancienne forêt et les deux nouvelles. Cela permet en particulier pour les clients de pouvoir transférer les informations portées par les anciens objets sur les nouveaux.

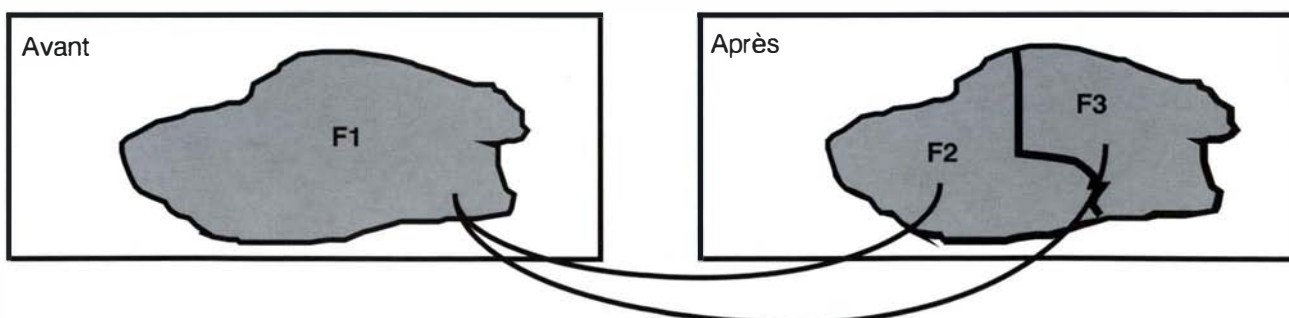


figure B.8.2 : relations de succession entre F1 et (F2, F3)

De tels principes sont donc à retenir lors du choix d'un modèle temporel.

Quelques modèles de données temporelles

Archivage

La méthode la plus simple pour gérer les bases de données géographiques est de conserver les différents états de ces données.

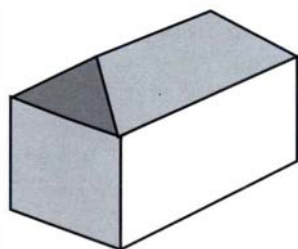
Ainsi, à l'image des activités d'un centre d'archivage, la base de données est conservée à différentes dates.

Cela fournit plusieurs clichés (« snapshots ») du monde réel.

Lorsqu'un rythme de mise à jour a été déterminé ou lorsque la base revêt d'un caractère légal, cela s'avère incontournable.

Ces différentes versions de la base de données sont donc non corrélées entre elles.

Base de données à la date T1



Base de données à la date T2

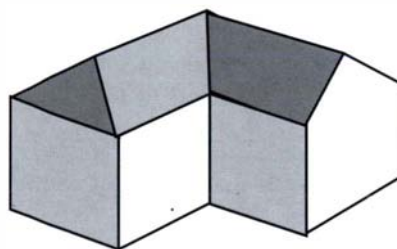


figure B.8.3 : archivage de base de données

L'avantage d'un tel principe est sa simplicité de mise en place et le peu d'efforts qui en résultent.

En revanche, outre un stockage vite volumineux, ce mode de stockage ne permet pas de retrouver aisément les évolutions sur le terrain (objets créés, objets modifiés, objets détruits).

Il ne permet pas non plus de savoir l'âge de la base (et donc de connaître l'obsolescence des données).

L'actualisation de la base chez un client semble également difficile sans perdre les informations que le client a lui-même saisies (il faut savoir différencier les modifications du fournisseur des modifications du client).

Versionnement d'objets [GANCARSKI 95] [SNODGRASS 92]

Le second type de gestion des bases de données consiste à conserver chacun des états des objets, autrement appelé versionnement des objets, c'est-à-dire qu'un objet n'est jamais détruit mais seulement remplacé par sa nouvelle version.

Il faut alors conserver tous les états de la base à toutes les dates. Cette base est appelée un *temporal composite* [LANGRAN, CHRISMAN 88].

Toutes les données peuvent être regroupées ensemble ou bien réparties dans plusieurs bases selon leurs dates de création (on parle alors de partitionnement temporel) ceci afin d'accélérer les accès ou de faciliter la gestion des données (gestion de l'état courant et report de tous les états antérieurs dans une autre base évitant le maintien de plusieurs graphes topologiques).

Versionnement avec estampille

Le modèle le plus simple pour gérer plusieurs versions des objets est d'ajouter une estampille temporelle sur les objets.

Cette estampille temporelle permet de classer les objets dans le temps et de conserver ainsi tous les états des objets.

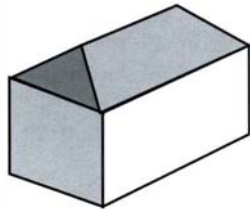
Comme il est illustré en figure B.8.4, deux attributs « date de création » et « date de suppression » de type Date peuvent jouer le rôle d'estampille temporelle.

C'est un mécanisme simple qui entraîne néanmoins une duplication de tout objet modifié (y compris sa partie invariante).

Des modèles plus sophistiqués ont proposé de versionner à la fois les objets et les attributs des objets apportant ainsi un degré de finesse suffisant pour les BD relationnelles et évitant ainsi toute duplication inutile.

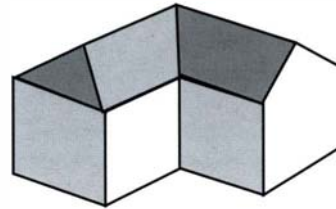
Cependant, ces modèles paraissent lourds à mettre en œuvre et modifient beaucoup le schéma de données initial.

Base de données à la date T1

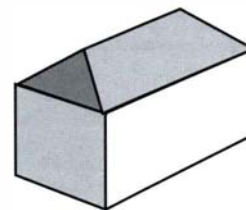


Date de création : T0
Date de suppression : ...

Base de données à la date T2



Date de création : T2
Date de suppression : ...



Date de création : T0
Date de suppression : T2

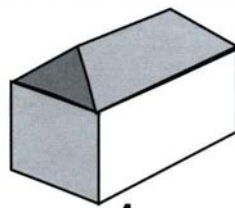
figure B.8.4 : versionnement d'objet via un attribut estampille

Le versionnement des objets via un attribut « estampille » permet la diffusion des mises à jour et la gestion de relation de succession entre objets. En revanche, la gestion des objets complexes ainsi que le maintien de la cohérence sont plus difficiles.

Versionnement par arbre de version

Un autre modèle de versionnement des objets consiste à créer un arbre de versions pour chaque objet. L'arbre est une structure qui permet d'éviter les redondances des attributs inchangés entre les versions d'objets.

Base de données à la date T1



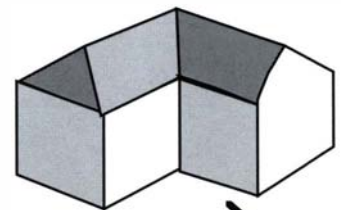
Création



résulte de



Base de données à la date T2



Extension



résulte de



Création



résulte de

figure B.8.5 : Versionnement d'objets via un arbre de version

Chaque objet est muni d'un identifiant de version qui correspond à la première position dans l'arbre. Si l'objet est modifié, une branche de l'arbre est créée et un nouvel identifiant de version est construit correspondant à cette branche.

Ce modèle de données a pratiquement les mêmes atouts et inconvénients que le modèle précédent. Il permet de modéliser élégamment les lignages entre objets (modifications sans changement d'identité seulement), de diffuser les mises à jour et de gérer les objets complexes.

En revanche, il est plus difficile de maintenir la cohérence et les relations de succession entre objets.

Modèle de journalisation et mutation

Le modèle de journalisation est un modèle dual du modèle de version. En effet, si le modèle de version vise à conserver tous les états des objets, le modèle de journalisation s'attache à conserver toutes les mutations qui sont intervenues sur les objets.

Ainsi, tous les événements qui font passer les objets d'une version à une autre sont enregistrés et classés, ce qui permet de reconstruire l'état de la base de données.

Le modèle de mutation [MOTET 93] [LATARGET et al 94] propose de conserver le dernier état de la base de données et toutes les mutations précédentes qui ont amené la base dans ce dernier état.

Ce modèle entraîne un volume de stockage faible mais la recherche d'un état d'un objet ou l'exécution de requêtes sur des états antérieurs nécessitent l'exécution à rebours de toutes les mutations, ce qui peut s'avérer long en temps de traitement.

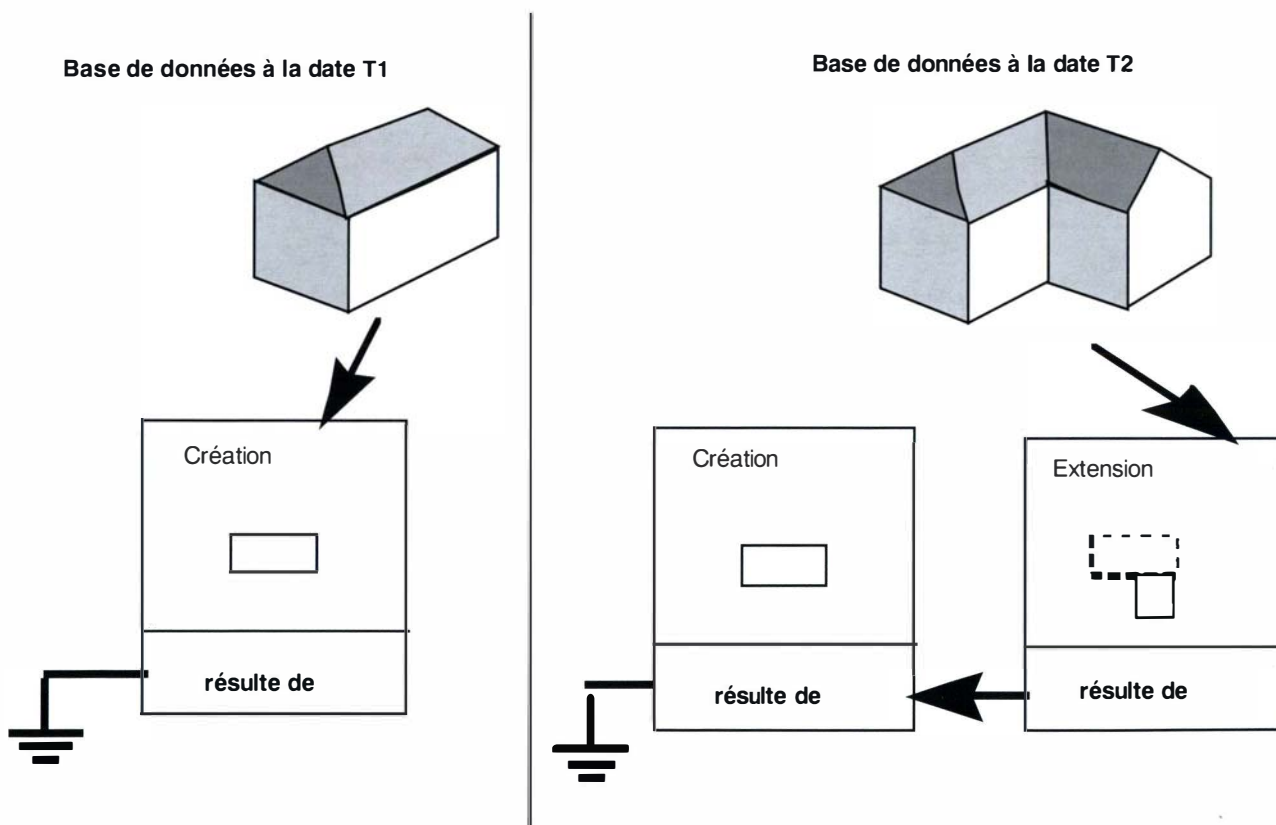


figure B.8.6 : modèle de mutation

Le principal risque encouru dans ce modèle est que les mutations soient incomplètes et qu'elles ne permettent pas de retrouver la version de l'objet à une date donnée par manque d'informations.

Par contre, les mutations peuvent fournir une information importante sur la nature des modifications subies par les objets (telle que la source d'information qui a suscité le changement, le type de modifications).

On retient ainsi une partie de la dynamique des objets.

En fait, le terme d'opération est problématique :

- il peut correspondre aux opérations de base, telles que « création », « suppression » et « modification d'un attribut sans changement d'identité »,
- il peut correspondre aussi à des opérations plus complexes, telles que fusion, scission, déformation, etc [CLARAMUNT, THERIAULT 95].

Or ces opérations se recouvrent entre elles et il est difficile de définir un ensemble minimal d'opérations non redondantes, ni de définir les limites de l'ensemble des opérations admises (étant donnée la complexité des données géographiques, bien des opérateurs peuvent être créés).

Cette incertitude nous amène donc à considérer un tel modèle comme un modèle externe qui peut être fondé sur une gestion de version mais qui ne peut être adopté dans un cycle de mise à jour de données.

De plus, il est difficile de maintenir la cohérence et de gérer les objets complexes.

Modèle de version de bases de données [Cellary, Jomier 90]

Dans tous les modèles précédents, les états ou mutations antérieurs à l'état actuel de la base sont stockés à l'intérieur de la base.

Ils peuvent ainsi interférer avec l'état courant, ce qui complexifie le maintien de la cohérence.

Or, dans le modèle de version de base de données, il y a une extension du modèle de version d'objets à la base de données, c'est-à-dire qu'un versionnement de bases de données est maintenu et est combiné à un versionnement d'objet (chaque version d'objet appartient au moins à une version de base de données).

Ainsi, à l'intérieur d'une version de base de données, on respecte toutes les contraintes d'une base de données classique ce qui permet un maintien de la cohérence.

Un mécanisme sophistiqué de création d'une nouvelle version de base de données par recopie logique permet de gérer autant de versions que nécessaire.

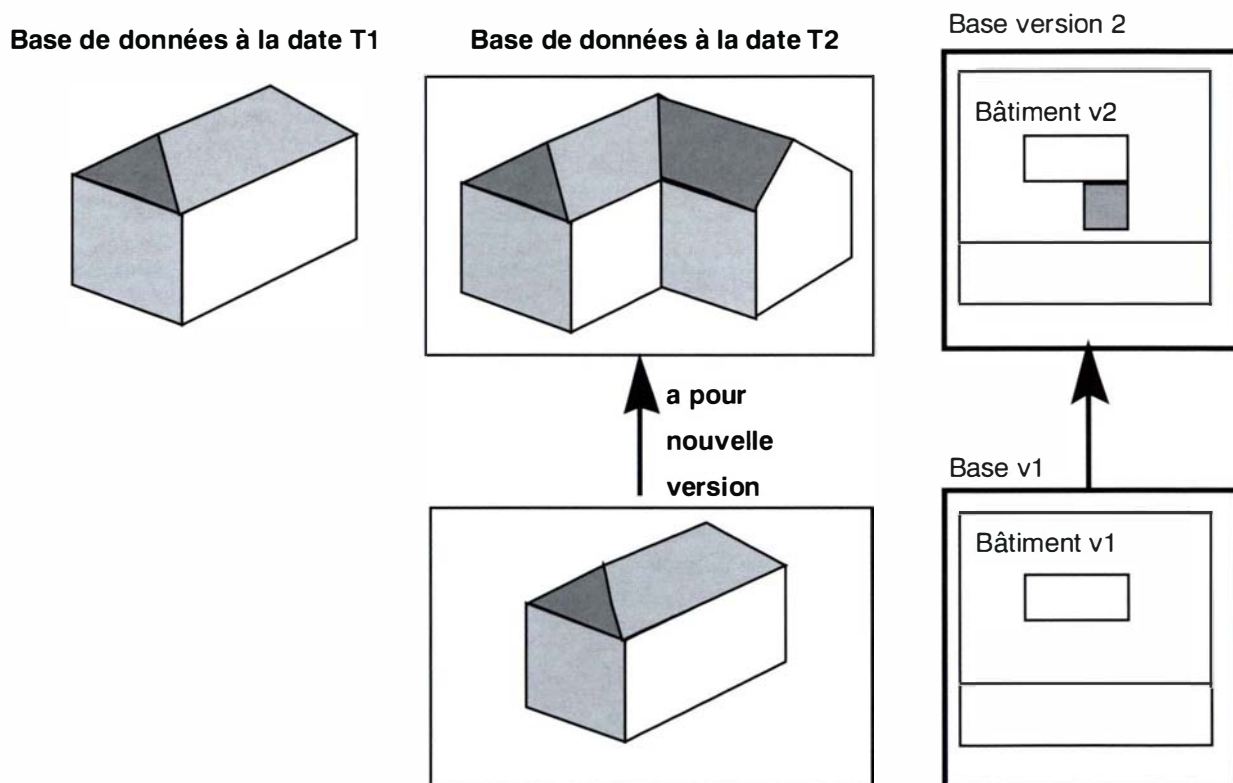


figure B.8.7 : modèle de version de bases de données

La gestion des versions successives d'objets ainsi que celle des objets complexes est donc supportée.

Cependant, l'introduction des relations de succession entre objets est difficile à implanter dans un tel modèle car elles violent les contraintes d'intégrité propres à chaque version de bases de données.

Synthèse

Par rapport à nos besoins initiaux, aucun modèle ne répond exactement à nos préoccupations.

Cependant, il est clair que les modèles de versionnement sont plus performants pour les tâches « statiques » d'interrogation, d'archivage tandis qu'un modèle de mutation est plus adéquat pour des tâches dynamiques telles que l'animation ou la mise à jour.

Regardons donc maintenant comment tirer parti de cette dualité.

Le projet COMMUTER

Contexte - objectif

Le projet COMMUTER (projet Esprit 22362) a pour objectif de définir un processus de mise à jour à distance et donc la définition d'un langage pour transférer les mises à jour depuis le poste de mise à jour distant jusqu'à la base de données « centrale ».

Le processus de mise à jour peut être décrit de la manière suivante :

- L'opérateur demande un extrait de la base de données pour la mettre à jour.
- Il y a sélection de l'extrait sur la base de données « centrale » et envoi sur le poste de mise à jour (l'extrait peut être mis au format du SIG au passage).
- L'opérateur fait les mises à jour.
- Le système produit un script de mise à jour qui est envoyé au serveur Commuter.
- Le script est interprété sur le serveur Commuter pour mettre à jour la base « centrale » et le script de mise à jour est ajouté à l'historique de la base.

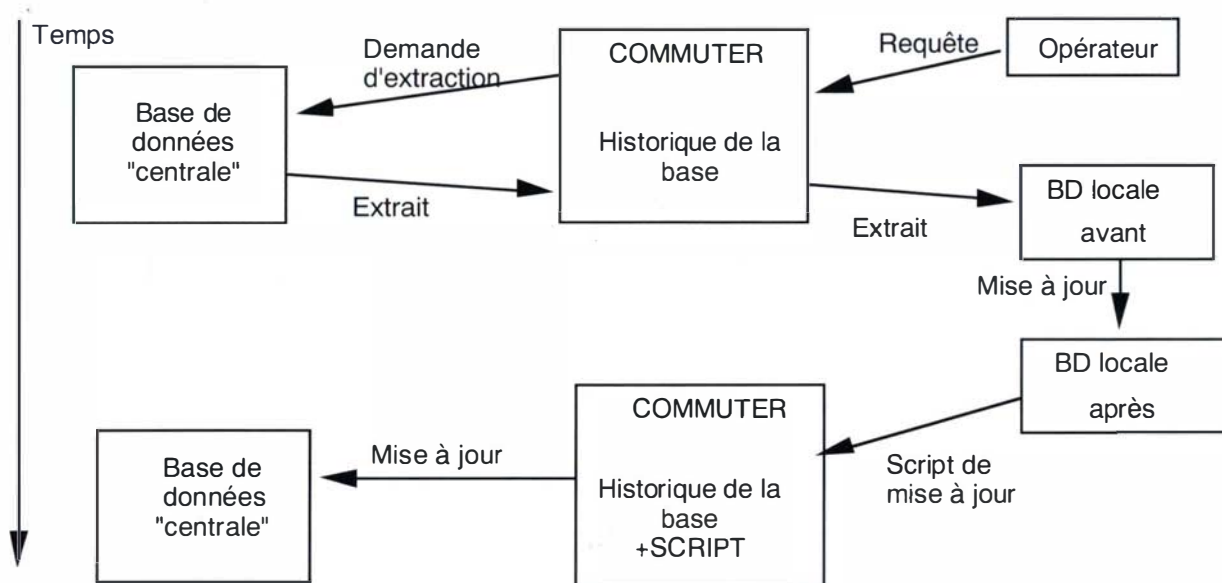


figure B.8.8 : Processus de mise à jour dans le projet Commuter

Bien entendu, une phase de validation est envisagée avant la mise à jour de la base centrale : cela peut être un opérateur particulier qui consulte le script de mise à jour (mise à jour « à blanc ») et vérifie que les spécifications de la base de données sont respectées ; cela peut être un processus automatique inséré dans le serveur Commuter.

Modèle de données

Le modèle spatio-temporel pour la mise à jour doit être compatible avec les SIG disponibles chez les partenaires du projet. Notre choix s'est donc porté sur un modèle simple de versionnement d'objet avec estampille temporelle.

Tout objet est temporel, c'est-à-dire qu'il peut avoir plusieurs états valides au cours du temps. On ajoute donc deux attributs datés « date de création » et « date de suppression » délimitant la durée de validité de l'objet dans cet état. Le lien entre différents états d'un même objet se fait à l'aide d'un attribut « ID » qui identifie de manière unique et pérenne tout objet (un objet a une seule et même valeur pour l'attribut ID quelque soit son état). Enfin, un attribut « statut » permet de connaître l'état de l'objet (« courant » ou « ancien »). Un objet peut porter des attributs. Les attributs ne sont pas temporels.

Les objets sont reliés entre eux par des liens. Ces liens ne sont que binaires et référencent les identifiants pérennes des objets. On considère également qu'un lien a une durée de vie limitée, c'est pourquoi il porte des attributs « date de création », « date de suppression » et « statut ». En revanche, les liens ne peuvent pas avoir plusieurs états de validité (si le lien ne référence plus les mêmes objets, il doit être mis dans un statut « ancien » et un nouveau lien doit être créé).

Enfin, les objets peuvent être reliés entre eux par une relation particulière appelée « Historique » qui assure la filiation entre objets.

Le modèle associé est illustré par la figure B.8.9.

Des classes particulières sont ajoutées pour les types géométriques POINT, CURVE et SURFACE en accord avec le document prENV 12160 du CEN/TC 287. Des associations particulières sont également ajoutées pour gérer les relations topologiques [COMMUTER 97].

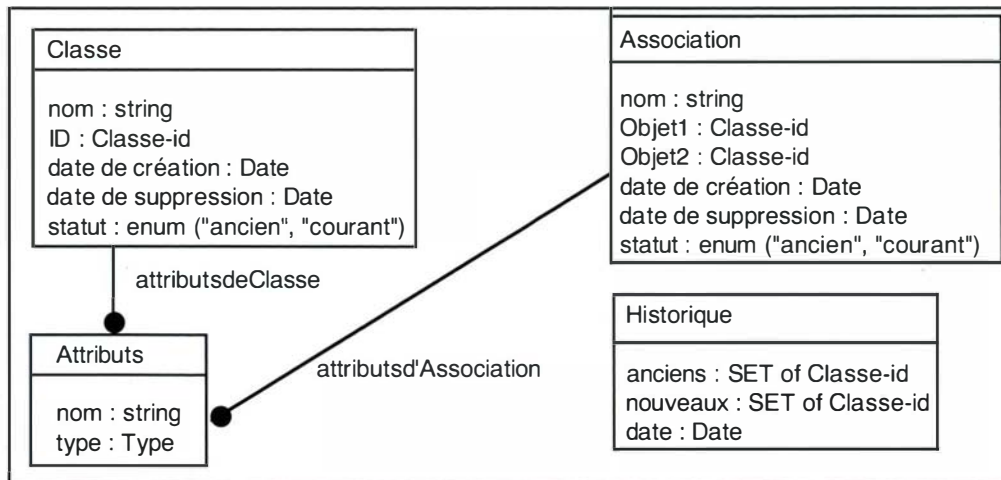


figure B.8.9 : modèle de données

Modèle d'opérations

Les opérations admises dans un tel modèle regroupent les fonctions de création, de désactivation et de remplacement d'objets par d'autres.

CRÉER - OBJET permet de créer un objet et nécessite l'affectation d'un nouvel identifiant et d'une date de création. Le statut est mis à « courant ».

CRÉER - ASSOCIATION permet de créer une association entre deux objets : l'association ainsi créée référence l'identifiant de chacun des deux objets et a une date de création et un statut à « courant ».

DÉSACTIVER - OBJET permet de « supprimer logiquement » un objet en remplissant la date de suppression et en mettant le statut à « ancien ».

DÉSACTIVER - ASSOCIATION permet de « supprimer logiquement » une association en remplissant la date de suppression et en mettant le statut à « ancien ».

REPLACER - OBJET permet de créer une association « Historique » entre deux ensembles d'objets. Cela nécessite de référencer les identifiants des anciens et nouveaux objets. Une date est également associée à une telle association.

REPLACER - ATTRIBUT - OBJET permet de créer un nouvel état pour un objet, c'est-à-dire qu'il y a une copie de l'objet courant, qu'il y a remplissage pour l'ancien objet de sa date de suppression et son statut à « ancien » ; qu'il y a remplissage pour le nouvel objet de sa date de création, de son statut à « courant » et de tous les attributs dont les valeurs ont changées (ce changement n'affecte pas bien sûr l'attribut identifiant).

Cette opération est équivalente dans le modèle de versionnement à une dérivation d'une nouvelle version suivie d'une affectation de valeurs d'attributs pour l'objet dérivé.

Cet ensemble d'opérations permet donc de manipuler les objets de la base tout en assurant un historique. Le script de mise à jour est constitué d'une suite d'opérations de ce type. Nous sommes bien conscients du caractère limité de ce jeu de fonctions mais nous pensons qu'il est possible de développer des « macro-fonctions » à partir de cet ensemble initial.

En particulier, le projet Commuter envisage d'encapsuler les fonctions d'édition graphique des SIG et de leur ajouter cette dimension temporelle à l'aide de ces opérations élémentaires.

Conclusion

Cet article a traité du problème de mise à jour de données topographiques et de la gestion de données spatio-temporelles dans ce contexte. Après un aperçu des modèles existants et au vu des besoins exprimés, le choix s'est porté sur un modèle simple de versionnement à l'aide de l'attribut estampille.

Un tel modèle trop simple nécessite la mise en place de mécanismes précis pour maintenir la cohérence de la base de données et pour gérer de façon adéquate les mises à jour (propagation des attributs ou des relations entre objets lors d'un remplacement d'un objet par un autre). Cependant ce modèle permet de journaliser les opérations de mise à jour et de les exécuter sur la base. Un passage automatique données <-> opérations est donc possible. Nous pensons ainsi qu'une diffusion des mises à jour vers les clients est possible à l'aide d'un tel modèle.

Les perspectives de recherche portent désormais sur un « typage » des opérations selon les objets géographiques (on ne manipule pas une parcelle cadastrale de la même façon qu'une voie routière) et sur la qualification temporelle des relations de dépendances entre les objets (parmi elles, la relation « partage de géométrie » revêt d'une grande importance); ceci est l'objet de la thèse de Thierry Badard [BADARD 96].

Références

- [ARMSTRONG 88] M.P. Armstrong : *Temporality in spatial databases*, in Proceedings of the GIS/LIS Conf, San Antonio, Texas (USA) vol. 2, (ACSM), pp. 880-889, 1988.
- [BADARD 96] T. Badard : *Propagation des mises à jour dans une base de données par analyse des changements géographiques*, rapport interne, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 1996.
- [BELLER et al 91] A. Beller, T. Giblin, KV. Le, S. Litz, T. Kittel & D. Schimel : *A Temporal GIS Prototype for Global Change Research*, in Proc. of the GIS/LIS'91 conf., Atlanta, Georgia (USA), pp 752-765, 1991.
- [CELLARY, JOMIER 90] W. Cellary & G. Jomier : *Consistency of Versions in Object-Oriented Databases*, in Proc. of 16th VLBD Conference, Brisbane, Australia, pp. 432-441, 1990.
- [CLARAMUNT, THERIAULT 95] C. Claramunt & M. Thériault : *Managing time in GIS : An event-oriented approach. Recent Advances in Temporal Databases*, Clifford S. and Tuzkilin A. eds, Springer-Verlag, Berlin (D), pp. 23-42, 1995.
- [COMMUTER 97] L. Raynal, Ph. Jolivet & F. Chirié : *10.5 TTML Specifications, projet Commuter*, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950060/S-RAP, 1995.
- [COOTE, RACKHAM 92] AM. Coote & L. Rackham : *Handling update : it is the data that lasts not the system*, AGI'92, pp. 23-25, 1992.
- [GANCARSKI 95] S. Gancarski & G. Jomier : Gestion des versions d'entités et de leurs cotetes : analyse et perspectives, Ingénierie des Systèmes d'Informations, vol. 3, n° 6, pp. 677-711, 1995.
- [GEOINFO 95] *Temporal Data in Geographic Information Systems*, Ed A.U. Frank, W. Kuhn & P. Haunold, Department of GeoInformation, TU Vienna, Austria, 1995.
- [IGBP 90] *The Initial Core Projects*, IGBP Report 12, Stockholm, Sweden, 1990.
- [LANGRAN, CHRISMAN 88] G. Langran & NR. Chrisman : *A framework for temporal geographic information. Cartographica*, 25(3) : 1-14, 1988.
- [LANGRAN 92] G. Langran : *Time in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, London (UK), 1992.
- [LATARGET et al 94] S. Latarget, C. Mach & S. Motet : *Gestion de l'historique de l'information localisée par des mutations. Les Journées de la Recherche CASSINI*, Lyon (F), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960032/S-COM, 1994.
- [MOTET 93] S. Motet : *A model for lineage and time management*, ESPRIT BRA AMUSING (EP 6881), Report D2.3.1, 1993.
- [NAS 90] *Research Strategies for the U.S. Global Change Research Program*, Ed. National Academy of Sciences National Research Council, Washington, DC (USA), National Academy of Sciences, 1990.
- [SNODGRASS 92] RT. Snodgrass : *Temporal Databases. Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, Ed. A.U. Frank, I. Campari and U. Formentini, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 639:22-64, 1992.
- [WORBOYS 94] MF. Worboys : *Unifying the Spatial and Temporal Components of Geographical Information*, 6th Int. Symposium on Spatial Data Handling, ed. Waugh, T.C. and Healey, RG., AGI : 505-517, 1994.

Publications

- [JOLIVET, RAYNAL 96] Ph. Jolivet & L. Raynal : *Quelle part accorder à la gestion de l'historique dans le processus de mise à jour ? Enquête utilisateurs*, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 960020 /S-RAP, 1996.
- [RAYNAL 96] L. Raynal : *Some elements for modelling updates in topographic databases*, in Proc. GIS/LIS'96, Denver, Co (USA), pp. 1223-1232, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 960030 /S-COM, 1996.

B.9 Évaluation du nouveau modèle du *Bernese Software*

Serge Botton

Contexte et objectifs de la recherche

Depuis 1992, l'Association Géodésique Internationale a mis en place un service IGS (International GPS Service for Geodynamics) qui fournit à l'ensemble des utilisateurs du système GPS, des orbites précises, des paramètres de rotation de la terre, des coordonnées et vitesses des stations de poursuite du réseau, des corrections pour les horloges des satellites et dans un avenir proche un modèle global d'ionosphère.

Le calcul de ces produits est assuré par sept centres d'analyse.

Parmi ces sept centres d'analyse de l'IGS, l'IGN (laboratoire LAREG) participe à l'un d'entre eux : CODE (Center for Orbits Determination in Europe).

Une convention entre l'IGN et l'AIUB (Institut d'Astronomie de l'Université de Berne), où est installé CODE, définit nos différentes activités communes. Durant l'année 1996, nous avons participé aux travaux de CODE à l'AIUB pendant trois mois.

Notre étude a porté sur l'évaluation des nouveaux modèles du Bernese Software (logiciel utilisé à Berne), ainsi qu'à des nouvelles stratégies de calculs.

L'amélioration de la qualité des produits IGS est due aux modifications incessantes réalisées par les différents centres d'analyse. Durant les années 1995 et 1996, les modifications apportées à CODE au Bernese Software ont été nombreuses et ont principalement porté sur les points suivants :

- calcul journalier d'un modèle global d'ionosphère,
- mise en place d'une nouvelle stratégie de fixation des ambiguïtés appelée QIF (Quasi Ionosphere Free),
- implémentation du nouveau modèle de pression de radiation (voir chapitre suivant) et utilisation d'accélération stochastiques afin de tenir compte des forces qui agissent sur les satellites et qui sont mal modélisées,
- nombreuses autres améliorations décrites dans le chapitre suivant.

Afin d'évaluer l'impact de ces modifications sur les résultats, il fallait disposer de solutions, sur une période assez longue, calculées avec la dernière version du logiciel et les comparer avec les solutions CODE officielles de 1995. La période choisie fut les quatre premiers mois de l'année 1995, et le retraitement se fit en utilisant l'ensemble des données GPS de l'IGS disponible pour cet intervalle de temps.

Le recalcul des données des huit derniers mois de 1995 ayant déjà été réalisé, l'évaluation des améliorations apportées au Bernese Software a pu se faire à partir des résultats d'un an de retraitement.

L'évaluation devant être la plus complète possible, plusieurs solutions ont été calculées (voir chapitre suivant). Cela a permis non seulement de tester les nouveaux modèles et les nouvelles stratégies mais aussi de contribuer à une recherche en cours à CODE sur l'influence des contraintes et des corrélations entre les différents paramètres et particulièrement entre les paramètres d'orbites et les paramètres du pôle.

Dans la suite de cet article nous présenterons des résultats obtenus uniquement avec les solutions réalisées à l'IGN. Un article plus complet est disponible au laboratoire LAREG.

Calculs 1996

Dans ce chapitre nous allons présenter, dans une première partie, les évolutions du Bernese Software.

Dans une seconde partie, nous décrirons l'ensemble de la chaîne de traitement et enfin nous donnerons une description sommaire des différentes solutions réalisées.

Le nouveau modèle de pression de radiation solaire

L'une des innovations majeure fut l'introduction au cours de l'année 1996 du nouveau modèle de pression de radiation solaire. Celui-ci a été élaboré à l'AIUB afin de combler les lacunes du modèle classique à deux paramètres.

Le nouveau modèle de pression de radiation est décrit en détail dans [BEUTLER et al 94], dans [ROTHACHER et al 96] et les premiers résultats obtenus dans [SPRINGER et al 96].

Sa présentation dans cet article sera assez succincte.

L'accélération \bar{a}_{rpr} due à la pression de radiation est :

$$\bar{a}_{rpr} = \bar{a}_{ROCK} + \bar{a}_D + \bar{a}_Y + \bar{a}_X$$

où :

\bar{a}_{ROCK} est la part de l'accélération prise en compte par le modèle de Rock,

et :

$$\bar{a}_D = [a_{D0} + a_{DC} \cdot \cos u + a_{DS} \cdot \sin u] \cdot \bar{e}_D = D(u) \cdot \bar{e}_D$$

$$\bar{a}_Y = [a_{Y0} + a_{YC} \cdot \cos u + a_{YS} \cdot \sin u] \cdot \bar{e}_Y = Y(u) \cdot \bar{e}_Y$$

$$\bar{a}_X = [a_{X0} + a_{XC} \cdot \cos u + a_{XS} \cdot \sin u] \cdot \bar{e}_X = Y(u) \cdot \bar{e}_X$$

a_{D0} , a_{DC} , a_{DS} , a_{Y0} , a_{YC} , a_{YS} , a_{X0} , a_{XC} et a_{XS} étant les neuf paramètres du modèle,

\bar{e}_D est le vecteur unitaire satellite-soleil,

\bar{e}_Y est le vecteur unitaire le long de l'axe des panneaux solaires,

$$\bar{e}_X = \bar{e}_Y \times \bar{e}_D,$$

u est l'argument de la latitude.

Les autres changements sont les suivants :

- utilisation d'accélération pseudostochastiques dans le modèle d'orbite,
- passage du modèle de potentiel terrestre JGM3 à GMT3,
- nouvelle valeur pour le nombre de love K_2 : 0,300,
- calcul des éphémérides de la lune et du soleil avec le modèle DE200 du JPL,
- utilisation d'un modèle de relativité générale pour les perturbations dues au champ de gravité terrestre,
- nouveau modèle de pôle : RAY-Model,
- passage du modèle de pression de radiation Rock S au modèle Rock T,
- conventions IERS 1996 pour les marées terrestres et océaniques.

Elimination des sauts de cycles

Les sauts de cycles, dans les mesures de phase, doivent être totalement éliminés afin d'obtenir des observations propres.

Pour atteindre ce but, une nouvelle stratégie a été adoptée qui tient compte de l'AS (Anti Spooting). Les résidus sur les observations, après une première solution, sont analysés afin de déterminer si des sauts de cycle n'ont pas été oubliés lors de l'étape spécifique pendant laquelle les mesures brutes sont nettoyées.

Résolution d'ambiguïtés

A partir du milieu de l'année 1996, une nouvelle stratégie de résolution d'ambiguïtés a été mise en place.

Elle repose sur la méthode appelée QIF (Qasi Ionosphère Free), décrite en détail dans la thèse de [MERVART 95], associée au modèle d'ionosphère calculé à CODE.

Les différentes étapes du calcul

Voici les différentes phases du calcul des solutions réalisées en 1996. Dans le tableau suivant, on décrit les différentes étapes permettant d'obtenir les solutions journalières.

Les solutions de trois jours étant réalisées par le cumul des matrices normales obtenues pour les solutions journalières.

Dans le paragraphe suivant, on présente en détail les solutions réalisées ainsi que les différents paramètres estimés.

table B.9.1 : les différentes étapes du recalcul des solutions d'un jour

Étape du recalcul	Description
Restore	Récupérer les fichiers de zéro-différences
SNGDIF	Création des simple-différences avec une nouvelle stratégie pour les bases courtes
PRETAB	Création des fichiers de tables d'orbites à partir des orbites précises CODE
DEFTST	Calcul des orbites précises utilisées dans les étapes ultérieures
MAUPRP	Nettoyage des simple-différences
GPSEDT	Vérifie les résidus d'une première compensation réalisée avec GPSEST afin d'éliminer les mauvaises observations restantes
GPSQIF	Résolution d'ambiguïtés avec QIF associée au modèle d'ionosphère CODE, pour les bases dont la longueur est inférieure à 2000 km
GPSCLU	Calcul des coordonnées des stations par groupes en utilisant les corrélations corrects et création d'une matrice normale par groupe de stations
ADDNEQ	Solution globale d'une journée (voir la description de la solution QN dans le paragraphe suivant)

Les différentes solutions du recalcul 1996

Pour cette étude les solutions suivantes ont été réalisées :

- une solution d'un jour par jour appelé QN,
- quatre solutions de trois jours par jour, c'est-à-dire que les calculs pour une journée sont réalisés avec les données du jour d'avant et celles du jour d'après.

QN : solution d'un jour

Les paramètres estimés sont les suivants :

- ERP : *Offset* et *drift* pour les coordonnées du pôle, *offset* pour UT1-UTC, résolution de deux heures,
- orbites : éléments osculateurs à l'instant initial de l'arc, deux paramètres de pression de radiation a_{D0} , a_{Y0} , deux accélérations pseudostochastiques,
- ambiguïtés : résolution pour les lignes de base inférieurs à 2000 km,
- troposphère : un paramètre toutes les deux heures,
- coordonnées du centre des masses de la terre contraintes,
- coordonnées des stations estimées, sauf pour les treize stations de référence pour lesquelles les coordonnées sont très fortement contraintes.

Solution de trois jours

Pour ces solutions, les paramètres suivants sont communs à l'ensemble des solutions :

- ambiguïtés résolues pour les lignes de base inférieures à 2000 km,
- coordonnées du centre des masses de la terre contraintes,
- coordonnées des stations estimées, sauf pour treize stations de références pour lesquelles les coordonnées sont très fortement contraintes.

Solution RN

- ERP : *Offset* et *drift* pour les coordonnées du pôle, *offset* pour UT1-UTC,
- orbites : éléments osculateurs à l'instant initial de l'arc, deux paramètres de pression de radiation a_{D0} , a_{Y0} , deux accélérations pseudostochastiques.

Solution X3

- ERP : *Offset* et *drift* pour les coordonnées du pôle, *offset* pour UT1-UTC,
- orbites : éléments osculateurs à l'instant initial de l'arc, deux paramètres de pression de radiation a_{D0} , a_{Y0} ainsi que leurs paramètres périodiques, deux accélérations pseudostochastiques.

Solution S3

- ERP : *Offset* et *drift* pour les coordonnées du pôle, *offset* pour UT1-UTC,
- orbites : éléments osculateurs à l'instant initial de l'arc, paramètres de pression de radiation a_{D0} , a_{Y0} , quatre accélérations pseudostochastiques.

Solution CN

- ERP : *Offset* et *drift* pour les coordonnées du pôle, *offset* pour UT1-UTC,
- nutation : $\Delta\epsilon$ et $\Delta\psi$ *drift* en respectant le modèle de nutation IAU,
- orbites : utilisations des orbites RN.

Les solutions officielles CODE

Les solutions d'un jour

Au début de l'année 1995, il existait deux solutions journalières réalisées par CODE. La différence entre les deux étaient la suivante, l'une avait les ambiguïtés libres (nommée G1), l'autre avait les ambiguïtés fixées (nommée Q1).

La solution officielle étant la première, la seconde ne le devint qu'au cours de l'année.

En effet chaque modification importante est testée et validée avant d'être intégrée à la solution CODE officielle.

Les autres paramètres estimés sont les suivants :

- ERPs : *offset and drift* pour les coordonnées du pôle x et y , *drift* pour UT1-UTC,
- orbites : éléments osculateurs à l'instant initial de l'arc, ancien modèle de pression de radiation à deux paramètres : $d0$, $y0$.
- troposphère : un paramètre toutes les deux heures,
- coordonnées du centre des masses de la terre contraintes,
- coordonnées des stations estimées, sauf pour les treize stations de référence pour lesquelles les coordonnées sont très fortement contraintes.

Solutions de trois jours

Comme pour les solutions d'un jour, les solutions CODE de 1995 étaient au nombre de deux, l'une nommée H3 avec les ambiguïtés libres, l'autre nommée R3 avec les ambiguïtés fixées.

Résultats

Statistiques pour les solutions de un jour

Les trois figures B.9.1, B.9.2 et B.9.3 montrent le nombre de fichiers de simple-différences utilisés, le nombre total d'observations et le nombre de paramètres à estimer avant fixation des ambiguïtés entières.

Ces statistiques étant données pour les solutions d'un jour du calcul officiel CODE 1995 (G1) et du recalcul de 1996 (QN).

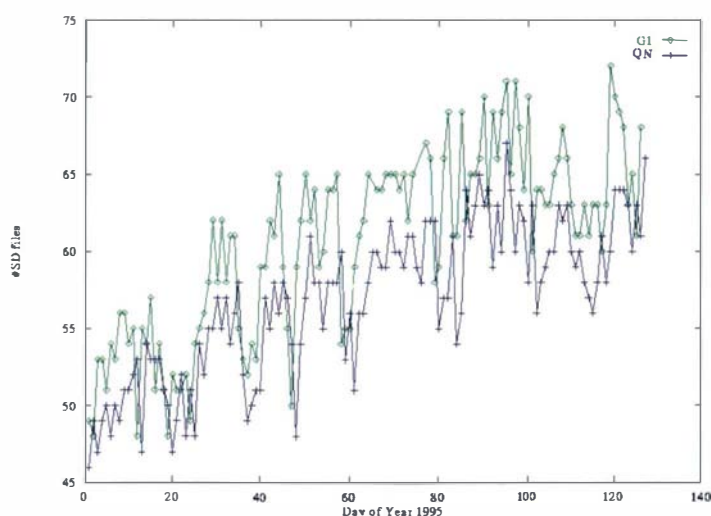
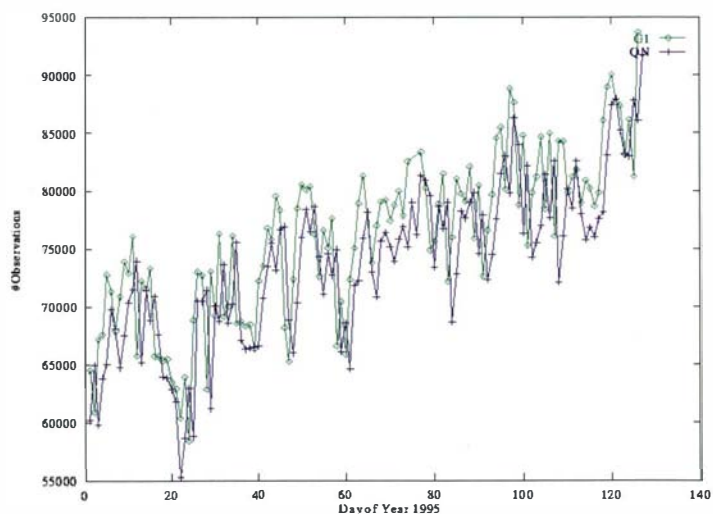


figure B.9.1

Comparaison du nombre de fichiers de simple-différences pour la solution Q1 de 1995 et la solution QN

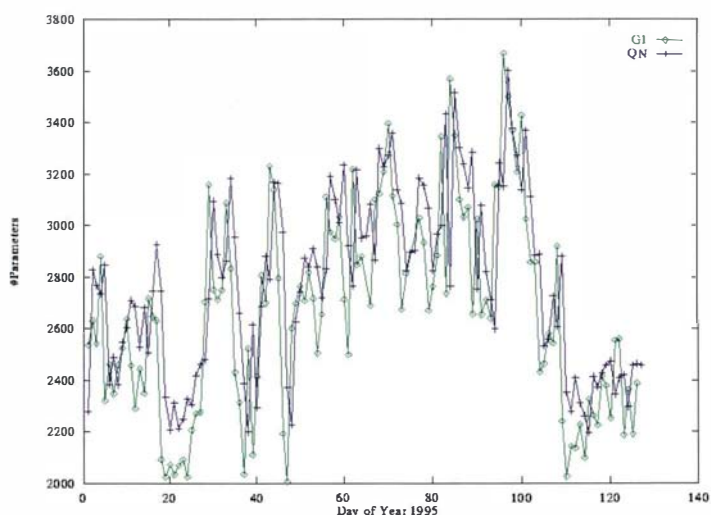
figure B.9.2
 Comparaison du nombre
 de double différences dans Q1 et QN



La différence (figure B.9.1) observée entre le nombre de fichiers de simple-différences entre les deux solutions est due, non pas à une différence de nombre de stations utilisées, mais à une différence de stratégie pour la formation des simple différences.

En effet une option permet de construire les simple-différences pour l'ensemble des bases au delà d'une longueur donné. En 1995 cette longueur était de 5000 km, dans les solutions de recalcul nous avons choisi 6000 km.

figure B.9.3
 Comparaison du nombre
 de paramètres estimés dans Q1 et QN



Cette figure B.9.3 met en évidence une diminution du nombre de paramètres estimés à partir du jours 108. Ce phénomène correspond à une période où l'*US Army* avait coupé temporairement l'AS (Anti Spoofing).

RMS *a posteriori*

Les deux graphiques B.9.4 et B.9.5 montrent le RMS *a posteriori* sur les solutions. Cette quantité donne une bonne estimation de la qualité des différentes des solutions.

La figure B.9.4 illustre le fait que le RMS pour les solutions 1996 n'est pas plus petit que celui des solutions CODE de 1995 mais de la même valeur.

Ce résultat, *a priori* paradoxal s'explique de la façon suivante : le fait de fixer les ambiguïtés tend à faire augmenter le RMS, par contre l'utilisation du nouveau modèle d'orbite et des accélérations pseudostochastiques tend à le faire diminuer.

La combinaison de ces deux effets donne le résultat observé plus haut.

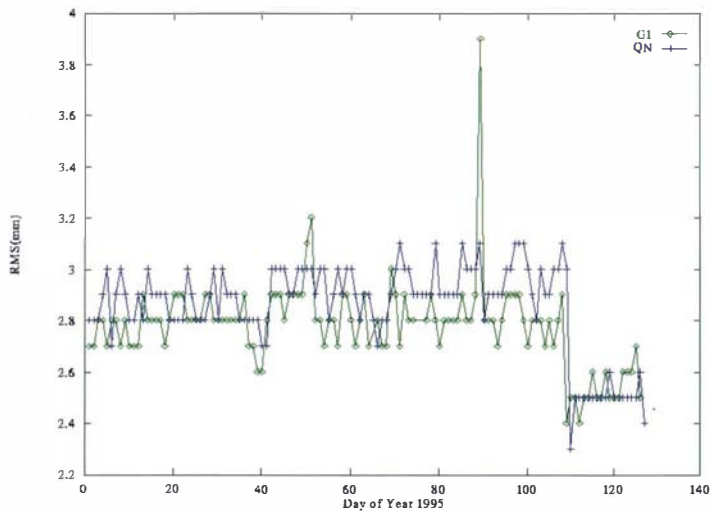


figure B.9.4

RMS pour les solutions G1 et QN

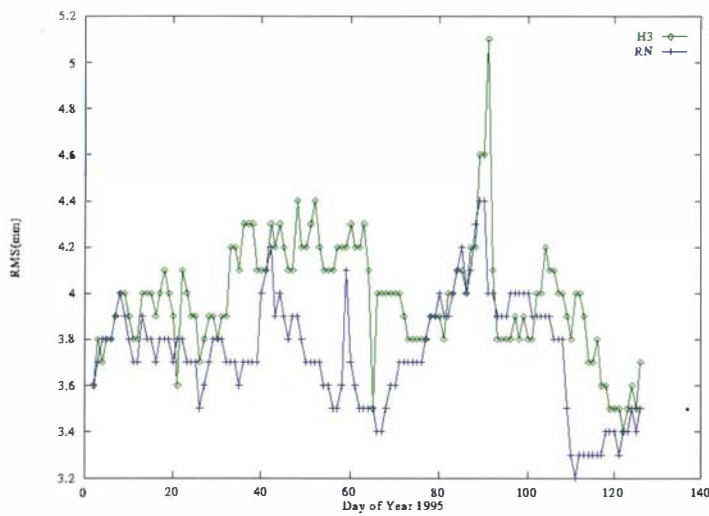


figure B.9.5

RMS des solutions H3 et RN

Dans les deux graphiques B.9.4 et B.9.5, on observe la conséquence du phénomène évoqué pour le nombre de paramètres estimés, c'est à dire l'influence de l'AS sur les observations. En effet à partir du jour 108, le RMS des solutions décroît fortement.

Cela prouve que la technologie des récepteurs n'est pas encore capable de fournir des données aussi bonne avec l'AS que sans l'AS, malgré les progrès réalisés ces dernières années dans ce domaine.

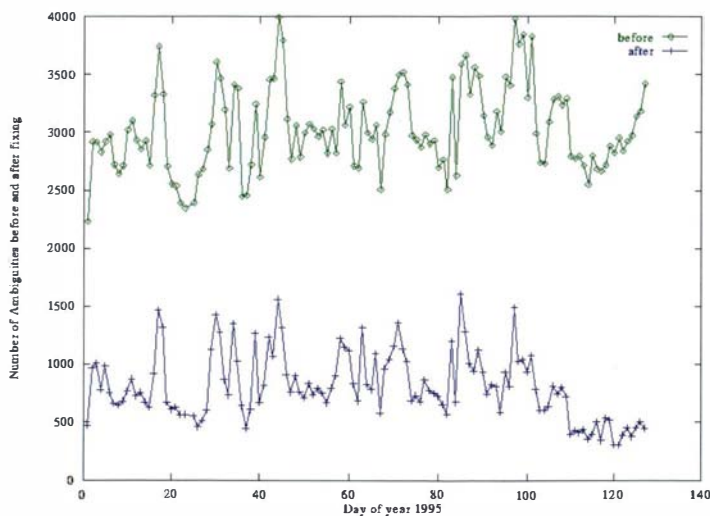


figure B.9.6

Nombre d'ambiguïtés avant et après fixation pour la solution QN

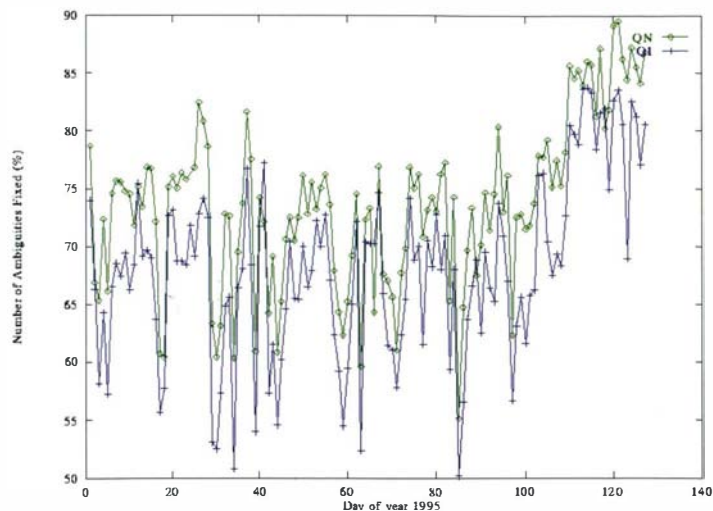


figure B.9.7

Pourcentage d'ambiguïtés fixés pour les solutions Q1 et QN

Ambiguïtés

Cette partie va permettre d'analyser l'impact de l'utilisation d'un modèle d'ionosphère associé à la stratégie de résolution d'ambiguïtés QIF (Quasi Ionosphere Free).

Aujourd'hui la résolution d'ambiguïtés se fait pour les lignes de base inférieures à 2000 kilomètres.

Les deux figures B.9.6 et B.9.7 montrent deux choses:

- l'utilisation d'un modèle d'ionosphère permet d'améliorer le pourcentage d'ambiguïtés fixées d'environ sept à huit points,
- par contre il est remarquable de constater que, lorsque l'AS est débranché, le pourcentage de fixation augmente d'environ vingt points.

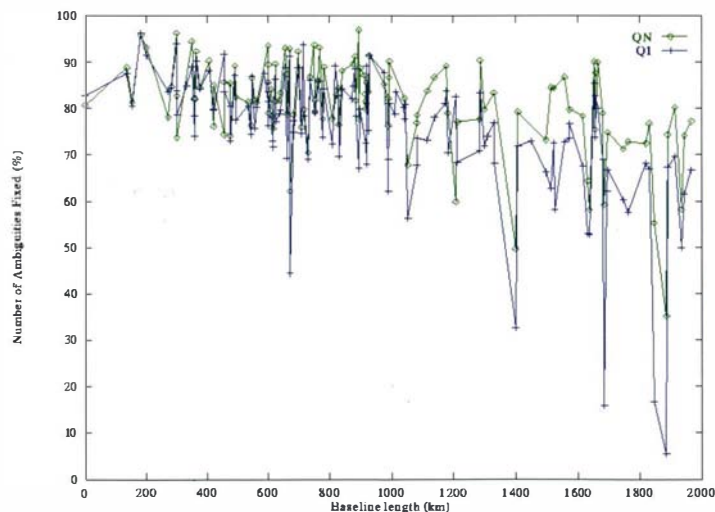


figure B.9.8

Pourcentage de fixation des ambiguïtés pour les solutions Q1 et QN en fonction de la longueur des lignes de base

La figure B.9.8 montre clairement que l'association d'un modèle d'ionosphère à QIF est beaucoup plus efficace pour des lignes de base longues.

Les Orbites

Ce chapitre va permettre d'évaluer les effets des changements réalisés sur la qualité des orbites, un des produits phare de l'IGS. Pour cela nous comparerons les nouvelles orbites précises avec les orbites officielles CODE et les orbites du JPL.

Cette comparaison est faite à l'aide d'une transformation de Helmert à sept paramètres. Le choix des orbites du JPL est dû au fait que, pour cette période, le JPL utilisait aussi un modèle d'orbite stochastique.

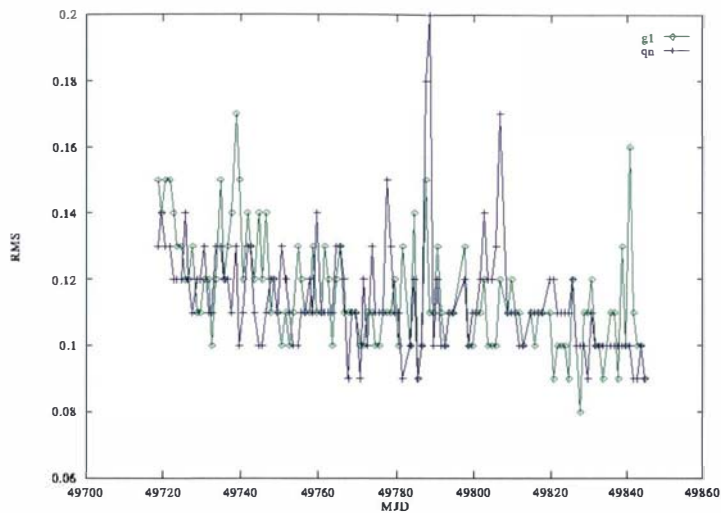


figure B.9.9

*RMS de la transformation d'Helmert
entre les solutions G1 et GN et la solution IGS*

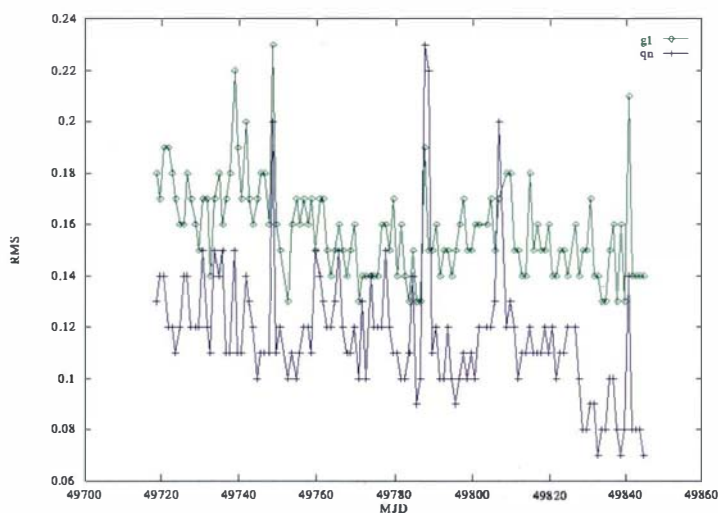


figure B.9.10

*RMS de la transformation d'Helmert
entre les solutions G1 et GN et la solution JPL*

La comparaison des orbites 1996 et CODE avec les orbites officielles (figures B.9.9 et B.9.10) montre un même niveau de qualité, par contre comparées avec les orbites JPL, les nouvelles orbites sont meilleures.

Cela prouve que le nouveau modèle d'orbites CODE est très cohérent avec le modèle du JPL.

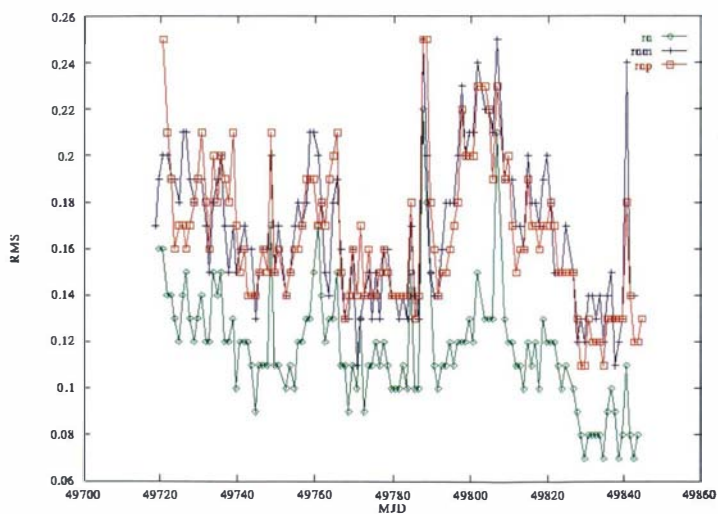
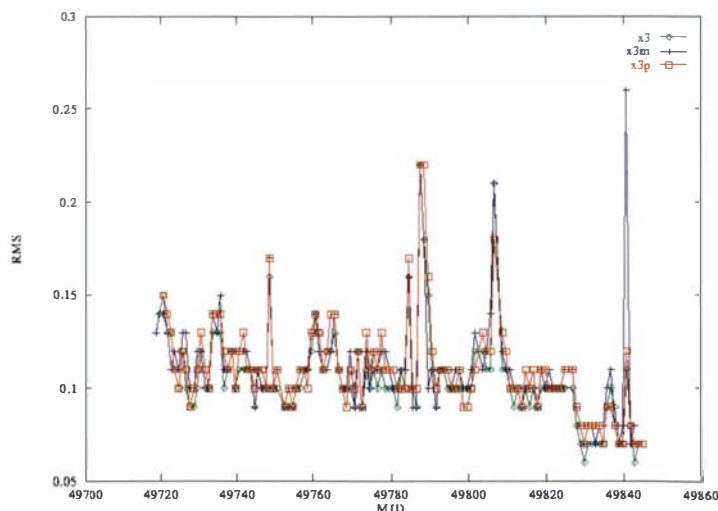


figure B.9.11

*RMS de la transformation d'Helmert entre le premier
jour (RNM), le jour central (RN) et le dernier jour
(RNP) de la solution RN et la solution du JPL*

figure B.9.12
*RMS de la transformation d'Helmert
entre le premier jour X3N, le jour central X3,
et le dernier jour X3P de la solution X3
et la solution JPL*



Les deux figures B.9.11 et B.9.12 illustrent parfaitement l'amélioration apportée à la détermination d'orbites.

En effet le calcul d'arcs d'éphémérides longs (ici trois jours) met en évidence les carences du modèle utilisé.

Or il est clair qu'aujourd'hui, contrairement aux solutions CODE de 1995, l'ensemble des trois jours de l'arc ont une qualité quasi égale.

Conclusions

Cette analyse des résultats du recalcul des données GPS de l'IGS nous a permis d'évaluer les modifications apportées au *Bernese Software* durant les années 1995 et 1996.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

— La nouvelle stratégie de résolution des ambiguïtés a permis un gain de sept à huit pour cent sur le nombre d'ambiguïtés fixées, ce résultat très bon ne doit pas masquer le fait que, durant la période non AS, le gain a été de vingt pour-cent.

Cela prouve que les effets des dégradations volontaires ne sont pas nuls même si ils sont limités et que la technologie des récepteurs, malgré les avancées de ces dernières années, ne peuvent encore capter la deuxième fréquence aussi bien sans code P qu'avec le code P.

— L'introduction du nouveau modèle d'orbite entraîne une amélioration de la précision des orbites. Les différents essais ont montré que l'estimation de l'ensemble des paramètres dans les directions *D* et *Y* associés à l'estimation de deux accélérations stochastiques par satellite donnait les meilleurs résultats. De plus dans ce cas la qualité de l'orbite ne se dégrade pas pour des arcs de trois jours. Ce point est important.

En effet aujourd'hui les centres d'analyse calculent des orbites prédites vingt quatre heures à l'avance pour un jour donné (non encore disponibles).

Ce type de calculs nécessite des modèles permettant de réaliser des arcs longs sans que la qualité en soit dégradée.

L'ensemble de ces conclusions permet de prévoir que l'IGS continuera d'améliorer ces produits et, dans un avenir proche, d'en proposer de nouveau comme des orbites précises disponibles vingt quatre heures à l'avance.

Références

[BEUTLER et al 94] G. Beutler, E. Brockmann, W. Gurtner, U. Hugentobler, L. Mervart & M. Rothacher : *Extended Orbit Modeling Techniques at the CODE Processing Center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS) : Theory and Initial Results*, Manuscripta Geodaetica, vol. 19, pp. 367-386, 1994.

[BROCKMANN 96] E. Brockmann : *Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS)*, Ph.D. thesis, Astronomical Institute, University of Berne, june 1996 (in print).

- [MERVART 95] L. Mervart : *Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System*, Ph.D. thesis, Astronomical Institute, University of Berne, february 1995.
- [ROTHACHER et al 96] M. Rothacher, G. Beutler, E. Brockmann, L. Mervart, S. Schaer, T.A. Springer, U. Wild, A. Wiget, C. Boucher & H. Seeger : *Annual Report 1995 of the CODE Analysis Center of the IGS*, 1996.
- [SCHAER et al 96] S. Schaer, G. Beutler, M. Rothacher & T.A. Springer : *Daily Global Ionosphere Maps Based on GPS Carrier Phase Data Routinely Produced by the CODE Analysis Center*, in Proceeding of the 1996 IGS Analysis Center Workshop (Silver Spring, MD), edited by P. Van Scoy and R.E. Neilan, Pasadena, CA, Jet Propulsion Laboratory, JPL Publication 96-23, 1996.
- [SPRINGER et al 96] T.A. Springer, M. Rothacher & G. Beutler : *Using the Extended CODE Orbit Model; First Experiences*, Paper presented at the 1996 IGS Workshop, Silver Spring, MD, USA, March 19-21, 1996.

Publications

- [BOTTON 96] S. Botton : *The Reprocessing of the CODE-IGS Data of 1995*, publication du laboratoire LAREG, série Memorandum, MM16, 1996.

B.10 Combinaisons de jeux de coordonnées de géodésie spatiale : un exemple-type d'estimation des composantes de la variance

Patrick Sillard

Résumé

Le système international de référence terrestre, maintenu à l'IGN dans le cadre de l'IERS est réalisé par l'intermédiaire d'une combinaison de jeux de coordonnées - vitesses de points terrestres issus de mesures de Géodésie Spatiale.

Tandis que les données s'améliorent et que les modèles s'affinent, des problèmes nouveaux dans l'analyse des divers jeux intervenant dans la combinaison apparaissent.

L'un d'entre eux concerne la pondération utilisée lors des compensations par moindres carrés effectuées en vue de réaliser le système international de référence terrestre. Ce texte présente les méthodes d'estimation des composantes de la variance utilisées pour remédier aux problèmes nouveaux évoqués plus haut.

Introduction

Le Système International de Référence Terrestre, appelé ITRS, est élaboré à l'Institut Géographique National, dans le cadre de l'IERS (International Earth Rotation Service), sur la base d'une combinaison par moindres carrés de jeux coordonnées cartésiennes et de vitesses de points issus de mesures de Géodésie Spatiale. La réalisation du système terrestre s'opère à un rythme approximativement annuel depuis la fin des années 1980.

Lors de l'élaboration de la dernière réalisation (ITRF94) qui a été l'occasion, pour la première fois, d'utiliser des matrices de variance complètes pour chaque jeu de coordonnées-vitesses, de nombreux problèmes d'origine statistique sont apparus. L'un des plus immédiats concerne l'estimation des composantes de la variance des observations (jeux de coordonnées).

Le système international de référence terrestre

L'IERS est un service scientifique international qui a en charge l'élaboration de références utiles aux domaines de l'astrométrie et de la géodésie. Ces références concernent en particulier, le système céleste, la rotation de la Terre et le système terrestre. Le système terrestre est réalisé annuellement par combinaisons de jeux de coordonnées de géodésie spatiale obtenus par les techniques de positionnement les plus précises existant actuellement : Global Positioning System (GPS), télémétrie laser sur satellite, interférométrie à très longue base et le système français DORIS. Concrètement, les jeux de coordonnées individuels sont calculés par des laboratoires participant à l'IERS et spécialistes de calculs de géodésie spatiale. Les jeux de coordonnées obtenus sont des sous-produits de calculs beaucoup plus vastes (cf. figure B.10.2) : calculs d'orbitographie satellitaire pour DORIS, GPS et télémétrie laser sur satellite et détermination de position de radio-sources extragalactique pour l'interférométrie à très longue base.

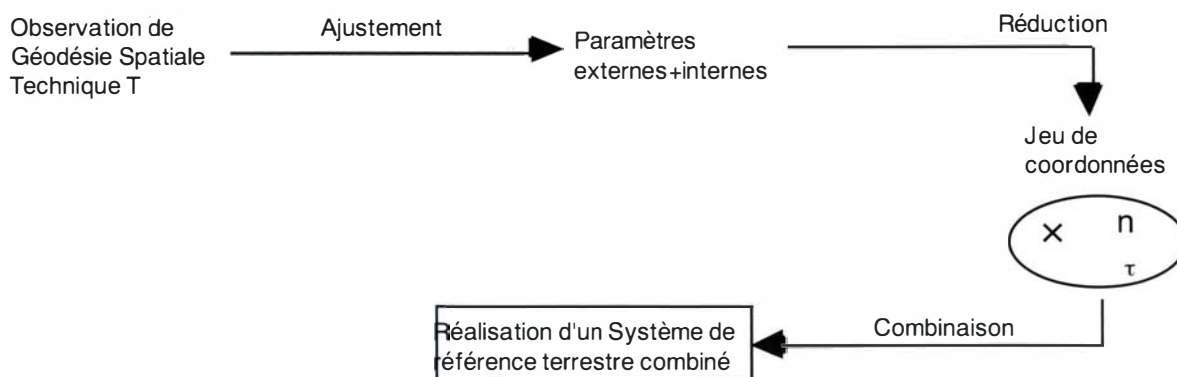


figure B.10.1 : processus d'obtention de jeux de coordonnées et combinaison

Les jeux ainsi obtenus concrétisent des systèmes de référence différents à des époques variées, de sorte que l'information complète comprend les positions de stations terrestres à des époques données ainsi que leur évolution temporelle estimée.

L'évolution temporelle est, à l'heure actuelle, considérée comme linéaire dans le temps.

L'ITRF94, dernière réalisation en date de l'ITRS [BOUCHER et al 96] comprend 201 sites terrestres renseignés (cf. figure B.10.2).

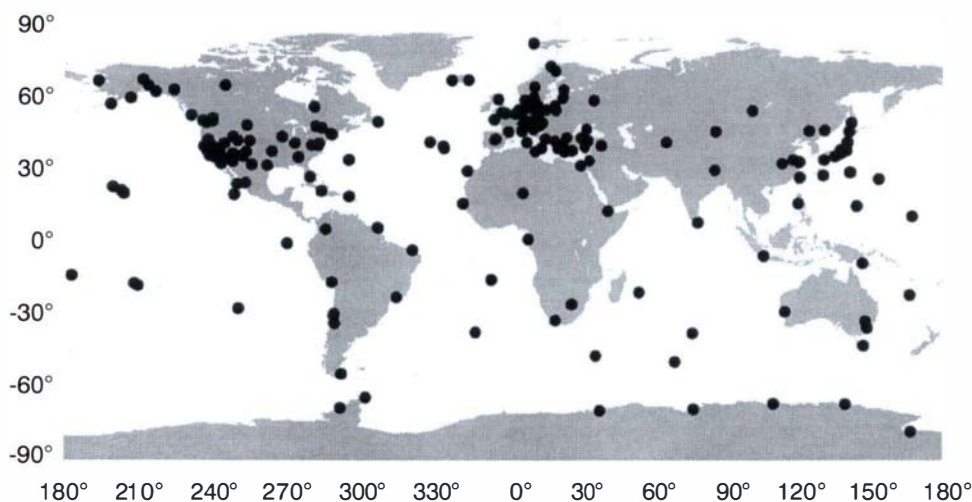


figure B.10.2 : sites de l'ITRF94

Mathématiquement, la combinaison de jeux de coordonnées peut s'exprimer de la façon suivante :

Le modèle de combinaison correspond à une similitude dans \mathbf{R}^3 .

Pour le point physique p auquel se rapporte une observation dans le jeu de coordonnées i , on écrit, sachant que le modèle complet est d'emblée linéaire pour des jeux de Géodésie Spatiale (rotation de quelques dizaines de mas, échelle de quelques 10^{-7}) :

$$X_p = X_p^i + \begin{pmatrix} T_x^i \\ T_y^i \\ T_z^i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k^i & -\omega^i & \psi^i \\ \omega^i & k^i & -\varepsilon^i \\ -\psi^i & \varepsilon^i & k^i \end{pmatrix} X_p^i$$

$$\text{où } X_p^i = (x_p^i, y_p^i, z_p^i), \text{ et sa dérivée temporelle : } \dot{X}_p = \dot{X}_p^i + \begin{pmatrix} \dot{T}_x^i \\ \dot{T}_y^i \\ \dot{T}_z^i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k^i & -\dot{\omega}^i & \dot{\psi}^i \\ \dot{\omega}^i & k^i & -\dot{\varepsilon}^i \\ -\dot{\psi}^i & \dot{\varepsilon}^i & k^i \end{pmatrix} X_p^i$$

Les inconnues du problème sont : $(X_p, \dot{X}_p, T_x^i, \dots, \dot{\omega}^i)_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq p \leq s}}$; n correspond au nombre de jeux utilisés dans la combinaison et s est le nombre total de stations terrestres renseignées dans au moins un jeu.

Le problème global de combinaison se résume en un système linéaire de la forme :

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} \overset{\circ}{Y}_1 \\ \vdots \\ \overset{\circ}{Y}_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

où ε_i est l'erreur commise sur la valeur exacte de la mesure notée $\overset{\circ}{Y}_i$.

Le modèle stochastique de base est :

$$E(\varepsilon_i) = 0$$

$$E(\varepsilon_i \varepsilon_j^T) = \delta_i^j \sigma_i \Sigma_i$$

avec $\sigma_i \in \mathbf{R}_*^+$, δ_i^j : Symbole de Kronecker; E désigne l'espérance mathématique

Le problème délicat concerne la qualité de l'estimation de la variance Σ_i dans le calcul amont. Il est fréquent que son estimateur soit à modifier de façon à vérifier certaines propriétés incontournables dans l'estimation par moindres carrés. Les modifications les plus simples qui puissent être apportées consistent à estimer un facteur de variance σ_i pour chaque population, une population correspondant à un jeu de coordonnées.

Il est parfaitement clair que ce modèle est le plus élémentaire qui soit : en particulier, il ne permet pas de prendre en compte d'éventuelles corrélations entre jeux de coordonnées qui peuvent physiquement exister.

Par exemple, il est fréquent que plusieurs jeux de coordonnées soient obtenus à partir de lots de données semblables mais analysés différemment. Dans ce cas, il existe une corrélation physique évidente non prise en compte dans le calcul de combinaison.

Dans ce texte, on se limite à des techniques d'estimation de composantes de la variance, dans le cas d'une variance diagonale par bloc (indépendance statistique postulée des diverses populations).

Principe de l'estimation des composantes de la variance

Le problème général d'estimation s'écrit, en variables aléatoires ($Y_i = \hat{Y}_i + \varepsilon_i$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \triangleright \begin{pmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} \\ \triangleright E(Y_i) = \hat{Y}_i \\ \triangleright \text{var}(Y_1^T, \dots, Y_n^T)^T = \text{diag}(\sigma_1 \Sigma_1, \dots, \sigma_n \Sigma_n) \end{array} \right.$$

où A_i est la matrice modèle liant les paramètres globaux X aux observations regroupées par populations cohérentes Y_i .

La variance des groupements d'observations Y_i est connue à un facteur de variance près réel σ_i , de sorte que $\text{var}(Y_i) = \sigma_i \Sigma_i$.

La matrice de pondération associée aux équations d'observations du problème précédent ne tient pas compte des σ_i .

Le système normal associé s'écrit donc : $(\sum_{i=1}^n A_i^T \Sigma_i^{-1} A_i) X = \sum_{i=1}^n A_i^T \Sigma_i^{-1} Y_i$

On notera v la matrice inverse de la matrice normale. On cherche à estimer les facteurs de variance σ_i à partir de critères à définir, lors du calcul de compensation.

Les deux méthodes proposées ci-après permettent d'obtenir des résultats satisfaisants et cohérents.

En particulier, lors de simulations numériques basées sur des reconstitutions de populations suivant une loi gaussienne, les facteurs de variance sont estimés à quelques pourcents près (moins de 10% dans tous les cas).

Estimation par la méthode du degré de liberté

La première méthode d'estimation utilisée à l'IGN est inspirée de [PERSSON 82] et est basée sur une analogie de l'estimation du facteur unitaire de variance σ_0 , pour lequel le facteur de redondance f de l'ensemble du calcul de moindres carrés est nécessaire :

$$\hat{\sigma}_0 = \frac{\hat{V}^T \Sigma^{-1} \hat{V}}{f}$$

Par analogie, on cherche à construire un estimateur $\hat{\sigma}_i$ des σ_i de la forme : $\hat{\sigma}_i = \frac{\hat{V}_i^T \Sigma_i^{-1} \hat{V}_i}{f_i}$

et f_i est un "estimateur" du degré de liberté associé au jeu i à construire.

Pour ce faire, on passe par l'étape intermédiaire qui consiste à identifier les σ_i au facteur unique global σ_0 et à construire, par population, un estimateur du σ_0 global, dans l'hypothèse restrictive où pour tout couple (i, j) , $\sigma_i = \sigma_j = \sigma_0$. Concrètement, on pose $\text{var}(Y_i) = \sigma_0 \Sigma_i$.

L'intérêt d'une telle approche est qu'elle permet d'associer à une population un estimateur du σ_0 et donc d'effectuer un test d'hétéroscédasticité des diverses populations [ROCHE 96].

Il est alors aisé de modifier les facteurs multiplicatifs σ_i afin de se rapprocher du cas où le test d'égalité des variances des populations devient positif.

On désigne par n_i le nombre d'observations renseignées dans le jeu i (i.e. $\text{rg}(\Sigma_i) = n_i$).

On peut vérifier que :

$$\hat{V} = \left[\begin{pmatrix} I_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & I_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} A_1 v A_1^T \Sigma_1^{-1} & \dots & A_1 v A_n^T \Sigma_n^{-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_n v A_1^T \Sigma_1^{-1} & \dots & A_n v A_n^T \Sigma_n^{-1} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix}$$

$$\widehat{V} = \begin{pmatrix} \widehat{V}_1 \\ \vdots \\ \widehat{V}_n \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix}$$

On définit $B_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_{n_i, n_i} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \in M_{\sum n_j, n_j}$, et on a immédiatement que $B_i^T \widehat{V} = V_i$.

Calculons à présent (on désigne par $\Lambda_{i,j}(M)$ le bloc (i, j) de la matrice M , et par $\text{tr}(M)$ la trace de la matrice M) :

$$\begin{aligned} E(\Sigma_i^{-1} B_i^T \widehat{V} B_i) &= \Sigma_i^{-1} B_i^T D E(Y Y^T) D^T B_i \\ &= \Sigma_i^{-1} \Lambda_{i,i}(D E(Y Y^T) D^T) \\ &= \Sigma_i^{-1} \sum_j \Lambda_{i,j}(D) \Lambda_{i,j}(E(Y Y^T)) \Lambda_{j,i}(D^T) \\ &= \Sigma_i^{-1} \cdot \left(\sum_{j=1}^n \sigma_0 A_j v A_j^T \Sigma_j^{-1} A_j v A_j^T + \sigma_0 \Sigma_i - 2\sigma_0 A_i v A_i^T \right) \\ &= \sigma_0 \Sigma_i^{-1} \cdot (\Sigma_i - A_i v A_i^T) \end{aligned}$$

Or $E[\text{tr}(\Sigma_i^{-1} B_i^T \widehat{V} B_i)] = E(V_i^T \Sigma_i^{-1} V_i)$, de sorte que :

$$E(V_i^T \Sigma_i^{-1} V_i) = \sigma_0 [\text{tr}(I_i) - \text{tr}(v A_i^T \Sigma_i^{-1} A_i)]$$

et finalement $\hat{\sigma}_0^i$, défini par ($N_i = A_i^T \Sigma_i^{-1} A_i$: matrice normale relative au jeu i) :

$$\boxed{\begin{cases} \hat{\sigma}_0^i = \frac{\widehat{V}_i^T \Sigma_i^{-1} \widehat{V}_i}{f_i} \\ f_i = n_i - \text{tr}(v N_i) \end{cases}}$$

est un estimateur sans biais de σ_0 .

Bien entendu, ce résultat ne permet pas, en l'état, d'estimer le facteur de variance associé au jeu i . Par contre, il permet de tester l'hypothèse d'égalité des composantes de la variance.

Approximativement, dans le cas où les observations suivent une loi normale, la distribution des estimateurs de σ_0 vérifie ($F(f_i, f_j)$ désigne la loi de Fischer - Snedecor à f_i, f_j degrés de liberté) :

$$\frac{\hat{\sigma}_0^i}{\hat{\sigma}_0^j} \in F(f_i, f_j)$$

De sorte qu'un test d'égalité des σ_i pourrait se traduire par :

$$\begin{cases} H_0 : \sigma_i = \sigma_j \\ H_1 : \sigma_i \neq \sigma_j \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} H_0 : \frac{\hat{\sigma}_0^i}{\hat{\sigma}_0^j} \in F(f_i, f_j) \\ H_1 : \frac{\hat{\sigma}_0^i}{\hat{\sigma}_0^j} \notin F(f_i, f_j) \end{cases}$$

Par conséquent, par un simple jeu de proportionalité, si on remplace dans l'estimation Σ par $\hat{\sigma}_0^i \Sigma_i$, la distribution de la variable $\frac{\hat{\sigma}_0^i}{\hat{\sigma}_0^j}$ suit effectivement une loi de Fisher - Snedecor de degrés de libertés correspondants, ceci n'étant vérifié que lorsque les estimateurs du σ_0 par populations sont proches de l'unité. On peut remarquer que f_i s'apparente à un estimateur du degré de liberté du jeu pour le calcul de moindres carrés présent.

Il ne dépend que du modèle et non des observations.

Estimation par la méthode de Helmert

La méthode de Helmert correspond à une méthode d'estimation des composantes de la variance parfois utilisée en géodésie [SAHIN 92] et mentionnée depuis quelques années dans des écrits à caractère théorique [GRAFAREND 84] de cette discipline.

Toutefois, la méthode est relativement bien connue des statisticiens qui l'identifient au sein d'une classe plus large de méthodes basées sur des constructions d'estimateurs quadratiques non biaisés (estimateurs MINQUE : *minimum norm quadratic unbiased estimators* [RAO 73] [RAO 88]).

On note :

$$\begin{cases} \Sigma^0 = \text{diag}(\Sigma_1, \dots, \Sigma_n) \\ \Sigma = \text{diag}(\sigma_1 \Sigma_1, \dots, \sigma_n \Sigma_n) \end{cases}$$

On a vu au chapitre précédent que $\hat{V} = DY$, donc :

$$\begin{aligned} E(\hat{V}^T \Sigma^{0-1} \hat{V}) &= E(Y^T D^T \Sigma^{0-1} D Y) \\ &= \text{tr}[D^T \Sigma^{0-1} D \Sigma] \\ &= \sum_{j=1}^n \text{tr}[\Lambda_{i,j} (D^T \Sigma^{0-1}) \cdot \Lambda_{j,i} (D \Sigma)] \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left\{ \delta_{ij} [n_i - 2\text{tr}(vN_i)] + \text{tr}(vN_i vN_j) \right\} \sigma_i \end{aligned}$$

or : $E(\hat{V}^T \Sigma^{0-1} \hat{V}) = \sum_{i=1}^n \hat{V}_i^T \Sigma_i^{-1} \hat{V}_i$, de sorte que le vecteur $\hat{\sigma}$ défini par :

$$\begin{cases} \hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \sigma_n \end{pmatrix} = H^{-1} \cdot q \\ H_{i,j} = \delta_{ij} [n_i - 2\text{tr}(vN_i)] + \text{tr}(vN_i vN_j) \\ q_i = \hat{V}_i^T \Sigma_i^{-1} \hat{V}_i \end{cases}$$

$$\text{est un estimateur sans biais du vecteur } \bar{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \sigma_n \end{pmatrix}$$

Cette deuxième méthode permet donc d'accéder à un estimateur sans biais des facteurs de variances σ_i par jeu.

Illustration des méthodes précédentes : retour sur le calcul de l'ITRF94

Les méthodes d'estimation des composantes de la variance exposées au paragraphe précédent n'ont pas été utilisées lors du calcul de l'ITRF94.

Toutefois, le problème du choix des pondérations était un problème crucial qui avait été résolu empiriquement à partir de l'analyse des résidus normalisés [SILLARD 95].

Avec les méthodes présentées ci-dessus, il est intéressant d'étudier les évolutions des valeurs de pondération et d'en évaluer l'impact sur la solution combinée déduite de ces pondérations.

L'illustration choisie est basée sur une combinaison des trois jeux DORIS utilisés pour le calcul de l'ITRF94.

Ces trois jeux ont été calculés par trois centres d'analyse différents : l'Institut Géographique National (IGN), le Center for Space Research (CSR) de l'Université du Texas et le Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale, Toulouse, France (GRGS).

La table B.10.1 donne les valeurs des pondérations obtenues par les trois méthodes :

- la méthode empirique utilisée lors du calcul de l'ITRF94 [SILLARD 95],
- la méthode du degré de liberté et,
- la méthode de Helmert, exposées au paragraphe précédent

Les valeurs des pondérations sont obtenues, dans les trois cas, par combinaison simultanée des trois jeux de coordonnées.

table B.10.1 : facteurs de variance estimés pour les trois jeux DORIS

	ITRF94	Helmert	d° de lib.
IGN	39,5	1,23	3,80
CSR	3,06	0,462	0,608
GRGS	247	290	386

Comme on peut le constater au vue de la table B.10.1, les valeurs des pondérations sont grandement changées, les deux méthodes rigoureuses étant toutefois relativement cohérentes.

Il est à prévoir que l'impact d'un tel changement de pondération sur la solution combinée est assez important.

Ce fait est confirmé par l'étude des écarts moyens quadratiques entre les trois solutions combinées.

Les valeurs de ces écarts sont présentées à la table B.10.2, les termes en gras correspondant aux écarts pondérés.

table B.10.2 : écarts moyens quadratiques, en millimètres, des trois solutions combinées

	Helmert		d° de lib.	
ITRF94	16,8	14,6	14,7	12,7
Helmert	*		3,92	3,17

↑ ↑
 emq emq pondéré

Il est clair que les écarts moyens peuvent être considérés comme importants compte tenu du fait que la précision théorique des mesures DORIS est sub-centimétrique. Aussi une variation de l'ordre de 1,5 centimètres sur la solution combinée est-elle tout à fait considérable.

L'enseignement principal qu'il faut tirer de cette illustration est l'ampleur des variations que peuvent causer, sur l'estimateur des moindres carrés, les pondérations choisies pour effectuer le calcul.

Il est donc essentiel de s'assurer un critère efficace de choix. Le critère de variance minimale réalisé par la méthode de Helmert est le seul raisonnable.

La table B.10.3, page suivante, confirme la caractérisation de l'estimateur de Helmert en tant qu'estimateur de variance minimale : la variance des paramètres de transformation permettant de passer du jeu du CSR au jeu combiné est minimale pour la méthode de Helmert (écart type sur la rotation en z passant de 8,4 centimètres pour l'ITRF94 à trois centimètres pour le calcul par la méthode de Helmert).

Par ailleurs, on peut également noter l'amplitude des variations sur les paramètres estimés eux-mêmes : 2,4 centimètres pour la rotation en z entre le calcul ITRF94 et le calcul par la méthode de Helmert.

table B.10.3 : valeur des paramètres de transformation estimés entre le jeu du CSR et le jeu combiné

	Tx cm	Ty cm	Tz cm	k 10 ⁻⁸	ε 0.001"	ψ 0.001"	ω 0.001"
ITRF94	- 1,77 ± ,64	- 1,13 ± ,64	1,40 ± ,85	- 3,034 ± ,273	,024 ± ,756	-, 249 ± ,467	,461 ± 2,790
d° de lib	- 1,78 ± ,26	-, 97 ± ,26	1,30 ± ,35	- 3,002 ± ,086	,056 ± ,261	-, 137 ± ,185	-, 361 ± 1,209
Helmert	- 1,85 ± ,21	- 1,02 ± ,21	1,27 ± ,29	- 2,992 ± ,050	,079 ± ,182	-, 141 ± ,147	-, 441 ± ,998

Pour conclure cet exemple, on peut noter que les estimateurs de Helmert et du degré de liberté sont relativement cohérents.

C'est un point positif car il faut souligner que si ces deux méthodes sont des méthodes itératives et donc, en cela comparables, la méthode du degré de liberté est beaucoup moins gourmande en temps de calcul que la méthode de Helmert.

Une combinaison des deux méthodes est donc tout à fait envisageable et constitue probablement l'approche à privilégier dans une optique routinière.

Limitations du modèle précédent

L'estimation des composantes de la variance présentée au chapitre "principe" correspond à un premier niveau de complexité dans la structuration du problème. Toutefois, il est clair que la prise en compte des "erreurs" sur l'estimation des variances Σ_i par multiplication scalaire des matrices a priori ne saurait rendre compte systématiquement des problèmes rencontrés lors des combinaisons de jeux de coordonnées.

En particulier, une nouvelle voie s'est ouverte récemment avec la prise de conscience de l'intérêt que pourraient présenter des combinaisons de séries temporelles de réalisations de systèmes de référence en vue de la détermination des variations du géocentre. Une campagne internationale, sous l'égide de l'IERS, doit précisément être menée sur ce sujet.

En prélude à l'implication du laboratoire LAREG dans cette expérience, une étude préalable a été pratiquée en combinant des séries temporelles de jeux de coordonnées DORIS et GPS, ces réalisations étant élaborées à une même fréquence mensuelle et aux mêmes dates.

Si l'information d'origine du système de référence sous-jacent au jeu de coordonnées considéré, est uniquement liée aux variations du centre de masse de la Terre, ces deux techniques dynamiques doivent être porteuses, en termes d'origine de système de référence, de la même information. C'est précisément cette information que l'on cherche à restituer par combinaison de jeux de coordonnées.

Les figures B.10.1, B.10.2 et B.10.3 présentent les évolutions temporelles des origines DORIS et GPS ainsi que l'échelle déterminées par rapport à l'ITRF94 sur les mois de novembre 1995 à mars 1996.

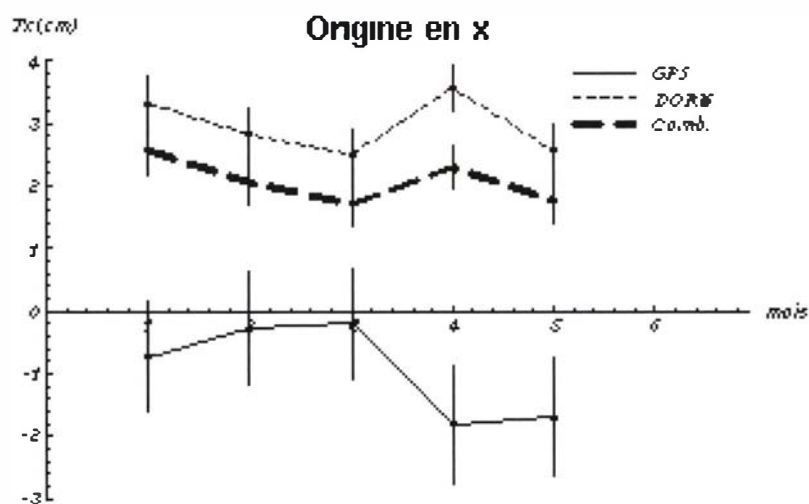


figure B.10.2

Variation en x du géocentre dans l'ITRF94.

La détermination "Comb." correspond à une détermination combinée des variations temporelles, l'idée étant d'imposer que les paramètres estimés soient égaux. Pour cela on impose une contrainte d'égalité très forte. Le point important, dans cet exemple réside dans le choix des pondérations relatives des informations de chaque population.

Dans le cas des déterminations par technique, il est très simple de pondérer une information par rapport à l'autre, la redondance instaurée par le modèle de combinaison s'effectuant sur les coordonnées - vitesses combinées seulement.

Par contre, dès que l'on combine les paramètres de transformation (i.e. on les contraint à être égaux aux mêmes époques), une nouvelle redondance est instaurée dans le calcul relative au système de référence lui-même.

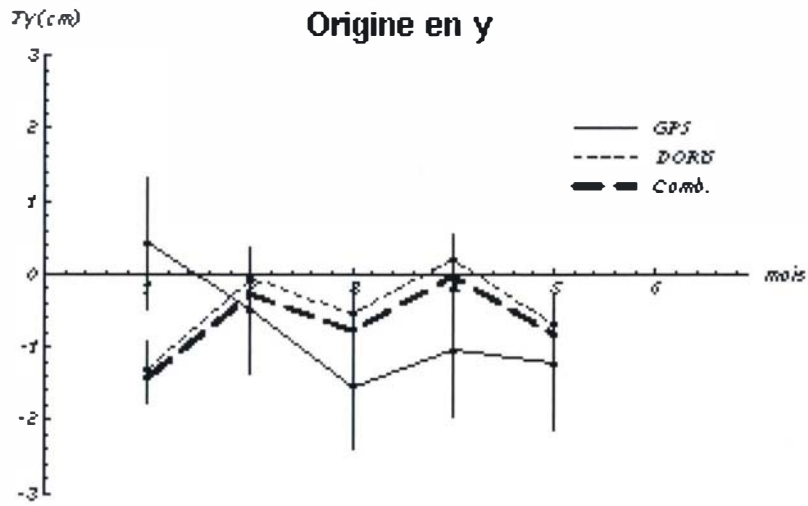


figure B.10.3

Variation en y du géocentre dans l'ITRF94.

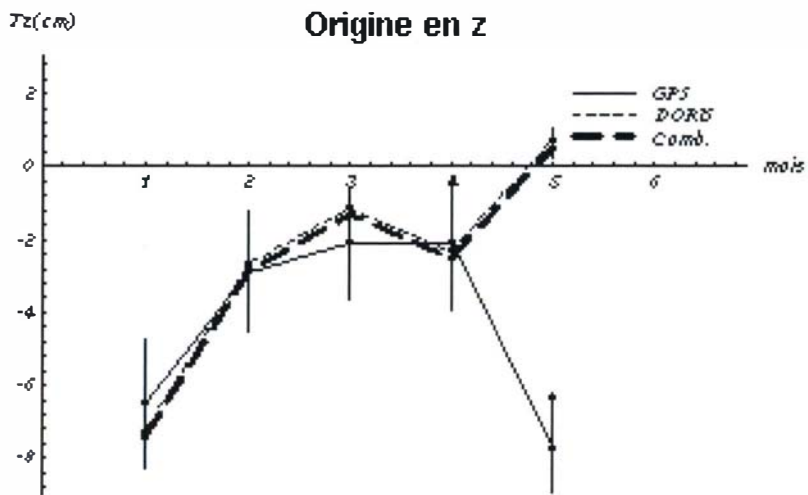


figure B.10.4 : variation en z du géocentre dans l'ITRF94

D'un point de vue théorique, il est possible de scinder le terme de variance a priori d'un jeu de coordonnées en deux termes, l'un relatif au bruit de mesure propre (bruit intrinsèque) et l'autre relatif à la définition du système de référence sous-jacent.

La structure du bruit de système de référence est parfaitement connue, et on peut montrer que ce terme de variance n'intervient que dans l'estimation des paramètres de transformation, et non dans l'estimation du jeu combiné [SILLARD 97] :

$$\Sigma_i = \Sigma_c^i + A \Sigma_\theta^i A^T$$

où Σ_θ est une matrice d'ordre quatorze correspondant à une variance des quatorze degrés de liberté de système de référence, A est la matrice jacobienne de la similitude linéarisée au voisinage de la transformation identique, Σ_c^i est une matrice positive de rang $n_i - 14$, Σ_i étant la matrice de variance originale du jeu de coordonnées i .

Ce développement théorique justifie que l'information de système de référence ne soit guère considérée dans les calculs classiques de combinaison.

Par contre, dès que l'on impose une redondance d'information sur le système de référence telle que l'égalité des paramètres d'origine entre deux jeux de coordonnées, il faut être vigilant quant aux pondérations relatives que l'on détermine.

Par exemple, dans le cas présent, on constate, au vue des figures B.10.2, B.10.3 et B.10.4, que la pondération déterminée sur la base d'un facteur multiplicatif par jeu n'est certainement pas adéquate pour restituer une information convenable combinée pour les paramètres de transformation : en effet, la courbe des paramètres combinée est systématiquement prioritairement influencée par les déterminations DORIS.

Ceci conduit à penser qu'il serait opportun de déterminer deux composantes de la variance dans ce cas précis, une relative au bruit de coordonnées qui conduirait à une estimation convenable des coordonnées combinées, et une autre, relative au bruit de système de référence qui conduirait à une estimation satisfaisante des paramètres d'origine et d'échelle combinées.

Cette décomposition est possible avec la méthode de Helmert généralisée aux cas où la matrice de variance de l'ensemble des observations n'est pas diagonale par blocs.

Le lecteur intéressé pourra se reporter à [GRAFAREND 84] pour une présentation complète de la méthode, ou bien [RAO 88].

Conclusion

En ce qui concerne les combinaisons de jeux de coordonnées, les problèmes exposés au deuxième chapitre sont résolus par les deux méthodes évoquées dans le troisième.

Ces deux méthodes ont donc été mises en pratique au sein d'un nouveau logiciel de combinaisons de jeux de coordonnées développé à l'IGN durant l'année 1996.

On a vu toute l'importance qu'il faut accorder à l'estimation des composantes de la variance si l'on souhaite mener un calcul rigoureux, d'autant que l'influence, sur les résultats du calcul, des valeurs des composantes sélectionnées est considérable.

Par ailleurs, il existe d'autres applications de la méthode d'estimation des composantes de la variance de Helmert faisant appel à des décompositions plus sophistiquées comme le suggère le quatrième chapitre.

Dans le cadre général, la méthode de Helmert permet de décomposer quasiment sans limite la variance d'observations à compenser par moindres carrés, pour peu que la structure de base de cette variance soit connue.

Concernant les travaux futurs, il est à prévoir que ces méthodes seront réellement appliquées dans des cas plus complexes que ceux évoqués au chapitre sur le principe de l'estimation, en particulier dans le contexte du calcul de l'ITRF94 ou encore pour évaluer des corrélations entre populations physiquement corrélées, et ce avec un certain bonheur, comme le laissent penser quelques tests en cours d'étude à l'IGN.

Références

- [GRAFAREND 84] E. Grafarend : *Variance covariance component estimation of Helmert type in the Gauss Helmert model*, Zeitschrift für Vermessungswesen 109, page 34, 1984.
- [PERSSON 82] CG. Persson : *Adjustment, weight-testing and detection of outliers in mixed SFF-SFS models*, in Manuscripta Geodaetica, vol. 7, n° 4, 1982.
- [RAO 73] CR. Rao : *Linear statistical inference and its applications*, John Wiley & Sons, 1973.
- [RAO 88] CR. Rao & J. Kleffe : *Estimation of variance components and applications*, North-Holland ed, 1988.
- [ROCHE 96] L. Roche : *Contribution à l'amélioration statistique des combinaisons de jeux de coordonnées*, publication du LAREG MS003, 1996.
- [SAHIN 92] M. Sahin, PA. Cross & PC. Sellers : *Variance component estimation applied to satellite laser ranging*, in Bulletin Géodésique, vol. 66, n° 3, 1992.

Publications

- [BOUCHER et al 96] C.Boucher, Z. Altamimi, M. Feissel & P. Sillard : *Results and analysis of the ITRF'94*, IERS technical note 20, 1996.
- [SILLARD 95] P. Sillard, Z. Altamimi & C. Boucher : *Analyses préalables à l'ITRF'94*, publication du LAREG MM 008, novembre 1995.
- [SILLARD 96] P. Sillard & C. Boucher : *Improvement of the transformation between ITRF and Doppler-Realized WGS84*, Journal of Geodesy, vol. 70, n° 11, pp. 168-180, septembre, 1996.
- [SILLARD 97] P. Sillard & C. Boucher : *Algebraic minimum constraints for reference frame datum definition*, soumis au Journal of Geodesy, 1997.

C. Bilan des actions de recherche

C.1 Image et photogrammétrie

Lecture de cartes scannées

Contexte et objectifs

Cette action de recherche se situe dans le cadre de l'aide à la saisie de la BDTOPO. En restitution numérique, une des difficultés majeures est la compréhension globale de la scène : les algorithmes ont plus facilement un comportement local. Or, l'information globale existe sur les cartes actuelles qui, de par la normalisation des images, se prêtent mieux à une analyse automatique.

Le principe est alors :

- d'utiliser les informations extraites de la carte pour créer des bases de données d'attente d'un contenu moins riche que la BDTOPO mais obéissant aux mêmes spécifications de représentation,
- d'utiliser simultanément la carte et l'image, cette dernière étant utilisée pour un recalage fin.

L'équipe « Cartes Scannées » a été mise en place en septembre 1994 au laboratoire MATIS. L'année 1995 avait été surtout une année d'initialisation pendant laquelle l'interprétation des planches s'est essentiellement limitée à la lecture d'une planche de bleu et d'une planche de rouge ne contenant que les routes principales.

L'année 1996 a atteint son rythme de croisière. Cependant, l'objectif initial d'arriver à une maquette de lecture totalement automatique au bout de deux ans n'est pas atteint aujourd'hui. On espère aujourd'hui arriver à une maquette à peu près complète sur la planche de Noves (Bouches-du-Rhône) d'ici à janvier 1997 et à transporter cette maquette sur une planche plus compliquée (planche de Caen) vers juin 1997.

C.1.1 Travaux généraux

Dans cette section, on regroupe un certain nombre de tâches qui ont été effectuées parce qu'elles répondaient à un besoin général de l'équipe mais que l'on peut difficilement attribuer de manière spécifique à une tâche d'interprétation de carte ou de plan.

Travaux logiciels

Par rapport à l'année précédente, où un important travail de portage sur l'environnement IGN avait été fourni, la part de développement de logiciels à usage général a été relativement faible.

Le principal travail a consisté à écrire une bibliothèque de quad-tree permettant de gérer de manière simple l'indexation géométrique des objets issus des phases de vectorisation et une bibliothèque de manipulation de graphes beaucoup plus modulaire et homogène que celle qui existait précédemment.

En plus de sa modularité dans la création-destruction d'objets, l'intérêt essentiel de cette nouvelle bibliothèque de graphes est que toutes les fonctions algorithmiques qu'elle offre peuvent être paramétrées en fonction de sous-graphes décrits de manière fonctionnelle. Par exemple, pour les problèmes de cheminement, on peut demander le plus court chemin entre deux sommets en se limitant aux arcs et sommets vérifiant telle ou telle propriété. Enfin, l'intérêt de ces deux bibliothèques est que l'on peut demander au programme d'associer un quad-tree à un graphe. On obtient ainsi une indexation géométrique automatique des arcs et sommets du graphe qui est pratique pour toutes les opérations de reconstruction des réseaux.

Ces bibliothèques sont utilisées dans à peu près tous les travaux de l'équipe (décomposition en segments de droite, extraction des courbes de niveau, reconstruction du réseau hydrographique, interprétation du cadastre...).

Travaux de documentation

En préparation de l'accueil de quatre stagiaires cette année, un effort assez important de documentation du logiciel CLISP utilisé par l'équipe a été consenti.

Rien n'avait été fait dans ce sens jusqu'à présent. Cette documentation, qui fait aujourd'hui cent cinquante pages, est loin d'être complète; elle serait notamment totalement insuffisante pour pouvoir installer aujourd'hui CLISP sur un site extérieur à notre équipe. On peut considérer qu'une petite moitié (correspondant aux fonctionnalités les plus importantes) a été écrite.

Décomposition en segments de droites

On a continué le travail entrepris l'année précédente sur la décomposition en segments de droite (DSD). Le principe est de disposer d'un algorithme permettant d'obtenir une vectorisation "parfaite" pour les parties d'image de la carte ou du plan qui sont effectivement formés de traits tirés à la règle.

Cette voie avait été explorée initialement pour la recherche de lignes électriques sur la carte IGN. En fait, cette application de l'algorithme a été abandonnée depuis que l'on a pris la décision d'utiliser la BDCARTO (voir chapitre 2.2.3) pour la recherche de ce thème. Par contre, la DSD a été utilisée comme méthode amont de vectorisation pour l'interprétation du cadastre et la recherche des serres sur la planche de noir IGN. Il est éventuellement possible qu'elle soit appliquée pour l'extraction de hachures sur la planche de vert. Ce travail est décrit en détail dans [LECOURT 96]

C.1.2 Travail sur la planche de noir

Présentation générale

Les travaux d'interprétation de la planche de noir ont repris assez activement depuis le printemps 1996. Presque tous les thèmes abordés ont déjà été traités "grossièrement" lors de travaux précédents (thèse de Deseilligny ou thèse de Guérin) [DESEILLIGNY 96] ou [GUÉRIN 96].

Ces travaux antérieurs avaient conduit à des maquettes donnant parfois des résultats prometteurs mais avec des taux d'erreur inacceptables pour un processus opérationnel et une caractérisation des erreurs ne permettant pas en général de poursuivre directement sur la même base algorithmique.

Le travail effectué actuellement sur la planche de noir est donc globalement un travail assez ingrat, puisqu'il s'agit souvent de reprendre complètement des modules qui marchaient "à peu près" pour arriver, on l'espère, à gagner les quelques pour cent qui séparent une maquette à présenter aux visiteurs d'une maquette pré-industrielle. Notamment, beaucoup des travaux réalisés cette années sont des travaux "préparatoires" qui ont pour but de simplifier au maximum les planches avant de pouvoir aborder avec la fiabilité requise l'extraction du réseau routier.

Écritures, symboles, habillage de la carte

Il s'agit des thèmes "à peu près stables" sur lesquels peu de travail a été fourni cette année.

Pour les écritures, on a terminé de mettre au propre le module de "vérification-correction" par apport de connaissances sur le langage [DESEILLIGNY 96].

Pour l'habillage de la carte (carroyage + croix kilométriques), les méthodes de recherche précise d'un symbole (ou d'une ligne) donné à partir de sa position approximative donnent de bon résultats.

Les programmes avaient été développés l'an dernier. Cette année, on a rajouté un module "d'effacement intelligent"; l'objectif de ce module est, une fois connue la position précise des objets, de les effacer de la carte sauf aux endroits où ils recouvrent d'autres objets. Cet effacement "intelligent" ne fonctionne pas à 100% puisque, quand on l'applique, on ne possède évidemment pas toute l'information nécessaire sur les objets recouverts. Cependant, en effectuant quelques hypothèses par défaut sur la formes des objets à préserver (essentiellement la continuité des traits), on arrive à éviter 80% des problèmes que pourrait créer un effacement brutal.

Utilisation de la BDCARTO

En juin 1996, un exemplaire de la BDCARTO sur la zone de Noves a été examiné. Après étude de la superposition entre la carte et la BD, il est apparu qu'il serait très intéressant de l'utiliser pour un certain nombre de thèmes "annexes". L'intérêt intrinsèque de ces thèmes, pour construire une BD à partir de la carte, n'est peut-être pas évident mais ils sont des éléments perturbateurs pour l'interprétation d'autres thèmes et notamment du réseau routier.

Le réseau électrique, les limites administratives et "peut-être" le réseau ferré sont des thèmes pour lesquels la BDCARTO fournit un modèle complet et topologiquement "parfait". On a donc abordé l'extraction de ces thèmes comme un problème de recalage de vecteur (= graphe BDCARTO) sur une image maillée (= carte scannée).

Les tests effectués sur le recalage des lignes électriques sont aujourd'hui à peu près satisfaisants sur la planche de Noves. Il est probable que les programmes nécessiteront une adaptation pour des planches plus compliquées telles que celles de Caen où il existe des lignes électriques parallèles distantes d'une longueur inférieure à l'imprécision

maximum entre carte et BDCARTO. L'extraction des limites administratives vient de donner lieu à une première maquette. Apparemment les résultats sont bons mais on a pas encore eu le temps de les intégrer au reste de l'application.

Pour ce thème on a choisi de privilégier une méthode générique et déclarative; plus précisément on adopte la démarche suivante :

- les légendes de représentation de chaque brin sont données au programme sous forme d'un motif périodique sur un "vocabulaire" de primitives graphiques données (trait, point...),
- un programme spécifique va rechercher sur la carte toutes les primitives présentes sur un certain voisinage du graphe BDCARTO,
- enfin, un programme générique prenant en paramètre la légende "formelle" et l'ensemble des primitives carte pré-sélectionnées va chercher, par programmation dynamique, la sous-liste de primitives qui "désobéit le moins" à la légende cherchée.

Le choix de cette approche générique a été effectué à la fois pour des raisons universitaires (nécessité de formalisation pour la thèse de Mariani) et pour des raisons pratiques (impossibilité de développer un programme par type de réseau).

Aucun test n'a été encore effectué sur le réseau ferré et l'adéquation du réseau BDCARTO à une extraction sur la carte n'est pas assurée.

Pour le réseau routier, on n'envisage pas d'utiliser de manière aussi intensive la BDCARTO car le graphe BDCARTO est très généralisé et très incomplet par rapport à la carte

Par contre on envisage éventuellement de s'en servir comme méthode "d'appoint" pour les applications suivantes:

- vérification que tous les brins de la BDCARTO sont appariables sur le graphe extrait de la carte et alerte (ou correction automatique) de ceux qui ne le sont pas,
- calcul d'attributs pour le graphe-carte,
- calcul d'un masque a priori pour la recherche des routes larges de la carte; cette partie est déjà réalisée et l'on peut ainsi appliquer des critères beaucoup plus sévères de détection sur le reste de la carte.

Arbres, talus

Il s'agit de deux thèmes annexes que l'on a décidé d'inclure assez tôt dans le processus d'interprétation pour les raisons suivantes :

- de toute façon, il faudra les extraire pour attribuer le réseau routier,
- il existe un certain nombre de configurations où le fait de les avoir extraits permet d'éviter de fausses détections de route.

Pour ces deux thèmes, l'objectif prioritaire, est de n'avoir aucune sur-détection. L'extraction des talus donne des résultats apparemment suffisants (on ne les a pas encore intégrés dans la chaîne globale).

L'extraction des disques, qui a dû être fortement transformée par rapport aux méthodes fonctionnant sur la planche de bleu, attribue à chaque disque un degré de fiabilité; en ne tenant compte que des disques considérés comme les plus fiables, on arrive à respecter le "contrat d'absence de sur-détection" tout en en supprimant plus de 70%.

Quelques pistes qui ont échoué

On décrit rapidement deux tentatives qui ont été finalement abandonnées.

Au début de l'année 1996, on a fait un essai d'extraction des routes et du bâti avec une approche "tout vecteur". Ce choix du "tout vecteur" avait été pris à partir des motivations suivantes :

- essayer d'effectuer un filtrage fiable du bâti qui permette d'éviter les nombreux cas de fausses détections rencontrées en milieu urbain; ce filtrage, qui nécessite un calcul de l'angle de connexion des bâtiments au trait de route, ne peut s'effectuer correctement qu'en mode vecteur,
- essayer de caractériser les routes comme l'axe médian situé entre deux traits parallèles noirs. Là encore, la notion de parallélisme ne se calcule bien qu'en mode vecteur,
- les essais de squelettisation en mode vecteur effectués pour le compte du projet PQBD (voir chapitre 2.4.3) avaient laissé espérer que ce serait faisable, on espérait, grâce aux critères sémiologiques "forts", que l'on peut implanter en mode vecteur, pouvoir extraire rapidement les routes sans avoir à effectuer de nombreux traitements préalables sur les thèmes susceptibles d'interférer avec le réseau routier.

Cette voie a été finalement abandonnée parce que, d'une part, la sélection des routes bien que de bonne qualité n'était pas suffisante pour s'affranchir d'une simplification préalable et que, d'autre part et surtout, la gestion en mode vecteur conduisait à des problèmes difficilement solubles d'assemblage des résultats obtenus sur différents découpages de carte (en effet, même en mode vecteur, les planches IGN sont beaucoup trop grandes pour être chargées complètement en mémoire).

Le temps consacré à cet essai n'est cependant pas complètement perdu. Le mode vecteur permet effectivement d'avoir une bonne caractérisation des bâtiments connectés aux routes et les algorithmes utilisés pour cette partie ont été repris dans la nouvelle approche testée (voir chapitre 2.2.6).

Par ailleurs, on a fait différentes tentatives d'extraction a priori des points de cote interrompant les routes. Le principe était que l'extraction des chaînes permettait de localiser assez précisément où pouvaient se trouver ces points de cote et que, si l'on y arrivait, on aurait modélisé toutes les sources potentielles d'interruption des routes.

Pour l'instant, tous les essais se sont plutôt soldés par des échecs; la raison principale est que l'on tombe sur un "cercle vicieux" assez courant : on cherche la position des points de cote pour faciliter l'extraction des routes mais pour retrouver la position d'un point de cote au milieu d'une route il est nécessaire d'avoir déjà un modèle des routes etc....

On a décidé d'abandonner, au moins provisoirement, cette recherche a priori pour revenir à une *validation a posteriori* lors des hypothèses de reconstruction du réseau routier.

Routes et bâti

Depuis la fin de l'été, on a repris le travail sur l'extraction des routes et du bâti. Ces deux thèmes sont très liés tant dans la réalité du terrain que dans leur représentation sur la carte, en ville les bordures sont souvent des limites de bâtiments. Cette interférence entre les deux thèmes est aujourd'hui une des difficultés principales à laquelle on se heurte pour une interprétation totalement automatique de la carte.

Compte-tenu des difficultés d'une gestion en tout vecteur et de l'insuffisance du mode maillé, on est revenu à une approche mixte déjà utilisée lors de la fin de la thèse de Deseilligny; c'est-à-dire :

- on utilise le mode vecteur pour toutes les notions où ce mode est naturel; il s'agit en général de notions faisant intervenir la notion d'angle,
- les résultats de tous les algorithmes, qu'ils soient vecteurs ou maillés, sont enregistrés en mode maillé pour éviter les problèmes de fusion vecteurs.

Les travaux réalisés sur le bâti sont :

- extraction du bâti isolé et du bâti respectant un modèle de connexion simple (forme épaisse connectée à un trait "localement droit"); le travail se fait essentiellement en mode maillé,
- extraction du bâti connecté selon des modèles plus compliqués; le calcul se fait uniquement en mode vecteur en analysant la façon dont un bâtiment est connecté à son environnement,
- dans tous les cas de détection de bâtiment connecté on veille à n'effacer que la partie du bâtiment qui ne marquerait pas un éventuel trait de route.

On arrive à effacer à peu près 80-90% des vrais bâtiments connectés sans, apparemment, en effacer de faux. En tant qu'élément de simplification pour les routes, ces résultats semblent suffisants.

Le reste des bâtiments connectés sera réanalysé une fois que l'on aura extrait un graphe routier valide. Pour les bâtiments isolés, on obtient pas loin de 100% de bonne détection.

Paradoxalement, les bâtiments isolés risquent de poser plus de problèmes, car il existe des vrais bâtiments isolés qui servent à marquer des bords de route; on en a dénombré deux sur la planche de Noves. C'est peu, mais il s'agit d'erreurs qui seront difficiles à rattraper ou à alerter de manière systématique.

La position que l'on adopte pour l'instant est que si les routes sont importantes on pourra au moins générer une alerte avec la BDCARTO ou la planche de rouge et que, sinon, on tolère un nombre faible d'omissions sur les routes secondaires.

On a ensuite abordé l'extraction des routes en reprenant à peu près la même démarche que lors de la fin de la thèse de Deseilligny. Cependant, cette fois-ci on a pu prendre le temps d'effectuer un travail beaucoup plus soigné tant pour l'élimination des thèmes perturbateurs que pour la vectorisation proprement dite.

A la mi-octobre, le travail sur les routes est encore en cours de développement; on en est à obtenir une vectorisation "brutale" de bonne qualité. Le travail de reconstruction validation reste à effectuer et est présenté dans la partie programme 1997.

C.1.3 Planche de bleu

Le travail effectué sur la planche de Noves a été porté sur la planche du Mont-Ventoux. Il s'agit d'une planche nettement plus dense que celle de Noves pour le réseau hydrographique. Un premier travail a consisté à porter les algorithmes existants sur la nouvelle structure de graphe (voir chapitre 2.1.1) afin de garder des temps de calcul et un encombrement mémoire raisonnables sur cette planche. La présence de nombreux marécages qui perturbent le réseau a

nécessité le développement d'algorithmes spécifiques. Schématiquement, l'algorithme commence par une reconnaissance de formes sur les particules connexes puis calcule un graphe de voisinage entre particules par des critères style "Voronoi" et, finalement, filtre les résultats en fonction des relations trouvées.

Ensuite, compte-tenu des erreurs observées, on a reprogrammé un certain nombre d'algorithmes de manière plus "propre". Notamment le problème du calcul d'attributs (par exemple : "trait plein/tirés") a été réécrit en utilisant un modèle d'appariement élastique que l'on résout par programmation dynamique. Le problème de l'attribution automatique des écritures au réseau a été abordé sur les deux planches. Ça marche à peu près sur ces deux planches. On ne poursuit pas pour l'instant cette recherche qui est un "joli" problème académique mais dont l'intérêt pour une éventuelle production IGN n'est pas encore évident.

L'ensemble des travaux réalisés sur la planche de bleu est décrit en détail dans [MARIANI 96a], [MARIANI 96b] et [MARIANI 96c].

C.1.4 Autres travaux

Le projet JOG

L'étude JOG concerne l'interprétation de cartes étrangères « papier » scannées en RVB. Après concertation avec la DGA, il a été décidé de consacrer ce mois-homme à effectuer un essai d'extraction automatique de MNT à partir des courbes de niveau de la carte.

Une maquette assez complète a été développée sur une des cartes fournies par la DGA. Les résultats obtenus dans des délais assez brefs nous semblent prometteurs; notre conclusion est que, des différents thèmes abordés lors de l'étude JOG, l'extraction de MNT à partir de cartes papier est le thème sur lequel, compte-tenu de la faisabilité et de l'intérêt opérationnel supposé, il est le plus "rentable" d'investir à moyen terme.

Pour plus d'information, on pourra consulter le rapport qui a été remis à la DGA. Ce rapport contient : un compte-rendu détaillé des méthodes développées, une analyse des résultats et de la typologie des problèmes non résolus, une quantification des erreurs et des propositions de prolongement pour arriver à un système opérationnel. Le travail va se poursuivre l'année prochaine par la thèse de Francois Dupont.

Stages accueillis

Cette année l'équipe « Cartes Scannées » a accueilli quatre stagiaires sur les sujets suivants :

- extraction d'objets complexes (stades, serres) sur la planche de noir IGN (Eric Debreuve, cinq mois, fin d'école d'ingénieur),
- lecture de planches cadastrales (Jérôme Piat, cinq mois, fin d'école d'ingénieur),
- lecture de plans de réseau EDF à grande échelle (Christophe Macquair, six mois, stage de DEA),
- reconnaissance de caractères par réseaux de neurones sur des cartes dessinées à la main (Stéphane Chataigner, trois mois, stage IT2, IGN).

Eric Debreuve a effectué un très bon stage sur un sujet volontairement restreint mais comportant la reconnaissance d'objets difficiles; en effet, les serres et les stades ne sont pas représentés de manière symbolique sur la carte 1 : 25 000 mais en fonction de formes variables représentant (plus ou moins...) leur forme réelle sur le terrain. Pour différentes raisons, notamment le fait qu'on lui ait demandé de ne pas à chercher à écrire du code réutilisable, son travail ne sera pas repris directement.

Ce travail nous aura néanmoins permis de savoir que, le jour où les erreurs sur l'extraction du réseau routier seront devenues suffisamment faibles pour qu'une partie importante soit due à ces objets, l'extraction de ces formes est à notre portée. Ce jour là, on s'inspirera sans doute des méthodes développées par lui. Pour l'extraction des serres, il a largement utilisé la décomposition en segments de droite (voir chapitre 2.1.3).

Jérôme Piat a abordé l'extraction des objets du cadastre en repartant de la décomposition en segments de droites mise au point par Fabrice Lecourt; en effet, cette décomposition est très bien adaptée aux planches cadastrales dont presque tous les traits (limites de bâti et hachures) sont des droites parfaites. Auparavant, la planche avait été simplifiée d'une partie des caractères, 90% des numéros de parcelles ont été enlevés et reconnus, en faisant tourner les programmes mis au point sur cartes IGN (mais sans réglage fin pour adaptation au contexte). Jérôme a ensuite abordé l'extraction des hachures et la reconstruction des bâtiments.

Les résultats obtenus semblent intéressants et suffisants pour "se convaincre en interne" que le problème est à notre portée. Cependant on regrettera que, faute de temps, on n'ait pas pu sortir de résultats globaux pour présenter le travail à la DGI ou à d'autres intervenants extérieurs potentiellement intéressés.

Le stage de Christophe Macquair s'est déroulé dans un contexte un peu particulier puisque la vectorisation des planches EDF ne correspond *a priori* pas à un besoin IGN que ce soit à moyen ou long terme. La direction des études et recherches (DER) d'EDF, qui souhaitait mener une étude sur le sujet, nous avait demandé si nous pouvions lui prêter (ou lui louer) l'environnement de développement mis au point dans l'équipe. Comme il s'agit d'un environnement de recherche

avec une documentation très incomplète, il nous semblait hasardeux de l'installer tel quel à la DER et nous avons fait la proposition d'accueillir à l'IGN le stagiaire EDF.

Techniquement, C. Macquair a réalisé un stage intéressant sur un sujet très difficile : les plans EDF sont très fortement surchargés, les reproductions disponibles pour scannage sont de mauvaise qualité et enfin la légende est beaucoup moins stricte que sur une carte ou une planche cadastrale. Il a abordé la détection de primitives bruitées et connectées telle que les disques, les carrés....Il a aussi testé des méthodes de vectorisation des traits par b-splines qui pourront peut-être être reprises dans certaines applications de l'équipe. Par ailleurs, on a pu vérifier que les méthodes d'extraction de caractères développées sur planche IGN étaient à peu près portables dans ce type de contexte. Les résultats sont évidemment moins bons que sur une carte; ceci est dû en partie à ce que l'on a, dans ce contexte, inhibé tout contrôle syntaxique.

Stéphane Chataigner a effectué un stage sur la reconnaissance de caractères manuscrits à partir de cartes fournies par le Service de Photogrammétrie et de Cartographie Numérique (SPCN) (voir chapitre 2.4.3) en utilisant des méthodes neuronales. Le SPCN n'était pas demandeur du sujet, seul un essai de vectorisation des contours nous a été demandé, et l'objectif du stage était de se faire, à l'intérieur de l'équipe, une idée de l'intérêt de ces méthodes en choisissant une application à un cas d'école. Globalement les résultats sont assez décevants; on ne sait pas encore très bien si cela est dû aux méthodes neuronales elles-mêmes ou au fait que le sujet était trop difficile pour un stage de trois mois.

Intervenants extérieurs

Une thèse sur l'interprétation automatique des planches de vert est réalisée par Vanary Méhas-Yedid à l'université de Paris-5 sous la direction du professeur Georges Stamon. Cette thèse est financée en partie par l'IGN. La thèse a commencé en mars 1994 et devrait être soutenue avant l'été 1997.

La DGA a financé une étude sur l'interprétation de cartes en RVB (voir chapitre 2.4.1). Cette étude a commencé en 1995 et une partie en avait été sous-traitée à Telecom-Paris. Pour l'année 1996, il ne restait qu'un mois-homme à consacrer à cette étude; il a été pris à l'IGN. La DGI a été contactée lors du stage sur l'interprétation de planches cadastrales.

Références

[DESEILLIGNY 95] G. Stamon & MP. Deseilligny : *Document Image Analysis in Cartography* » Second Asian Conference on Computer Vision, Singapore, vol. 3, pp. 378-383, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950038/C-COM, décembre 1995.

[DESEILLIGNY 96] MP. Deseilligny & H. Le Men : *Correction d'erreurs par apport de connaissances sur le langage dans la lecture des écritures sur cartes scannées*, 4th Colloque National sur l'Écrit et le Document, Nantes (F), pp. 109-116, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960022/C-COM, juillet 1996.

[LECOURT 96] F. Lecourt & MP. Deseilligny : *Algorithme de reconstruction d'éléments rectilignes dans une image vecteur*, 4th Colloque National sur l'Écrit et le Document, Nantes (F), pp.101-108, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960001/C-COM, juillet 1996.

[MARIANI 96a] R. Mariani, F. Lecourt, M. Pierrot Deseilligny, Y. Lecourtier, J. Labiche & R. Mullot : *Interprétation de cartes géographiques. Algorithmes de reconstruction des réseaux hydrographiques et routiers* » 10^{ème} Congrès sur la Reconnaissance des Formes et l'Intelligence artificielle, Rennes (F), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960002/C-COM, pp. 34-42, 1996.

[MARIANI 96b] R. Mariani, MP. Deseilligny, Y. Lecourtier & J. Labiche : *Geographic Map Understanding. Attribute Computation for Hydrographic Network Reconstruction* » Southern Symposium on Image Analysis and Interpretation, San Antonio (USA), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960003/C-COM, avril 1996.

[MARIANI 96c] R. Mariani, MP. Deseilligny, Y. Lecourtier & J. Labiche : *Reconstruction de surfaces et extraction de lignes tirées pour l'interprétation des cartes géographiques au 1 : 25.000*, 4th Colloque National sur l'Écrit et le Document, Nantes (F), pp. 31-38, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960004/C-COM, juillet 1996.

C.1.5 Comparaison d'un modèle à un couple d'images aériennes pour la détection de changement

Olivier Jamet

Rappel des objectifs

Disposant d'un modèle géométrique incomplet du bâti en zone urbaine (par exemple, les contours des îlots, comme dans une majorité de cas en BDTOP) et de couples de photographies aériennes plus récentes que le modèle, on se propose d'étudier une mesure de la compatibilité entre le modèle et les images, permettant de diagnostiquer automatiquement les modifications intervenues sur les objets du modèle entre sa date de saisie et la date d'acquisition des images.

Par rapport au contexte opérationnel, on souhaite idéalement que le procédé proposé présente un taux d'erreur du même ordre de grandeur que celui de l'opérateur humain, ou du moins d'un ordre de grandeur inférieur à celui de la décision globale consistant à considérer que le bâti construit n'a pas changé. Du point de vue scientifique, on s'intéresse donc principalement à la maîtrise de la robustesse du procédé, et la démarche est orientée vers la recherche d'une formulation intégrant globalement les contraintes utilisables (les contraintes photogrammétriques, entre autres) comme support à un diagnostic de la significativité des différences constatées entre la base et les images.

Activités 1996

Elle s'est organisée autour de trois pôles.

Développements

Les développements de support de cette recherche ont pour l'instant essentiellement concerné la photogrammétrie. Les bibliothèques existantes au laboratoire ont été reprises dans le but de :

- définir un descripteur d'orientation portable (c'est-à-dire utilisable en dehors du laboratoire),
- normaliser les calculs de projection, de façon à permettre l'utilisation des mêmes fonctions, que les images soient dans leur géométrie initiale ou en géométrie épipolaire,
- ajouter quelques fonctionnalités, comme le calcul de la direction du soleil en fonction de l'heure et du lieu de prise de vue, supposés connus.

La bibliothèque réalisée a été livrée à l'ENSEA dans le cadre d'une collaboration en cours de mise en place. L'analyse effectuée pourra par ailleurs constituer une contribution aux développements de normalisation de la photogrammétrie du laboratoire proposés cette année.

Comparaison entre images de dates différentes

Un stage a été effectué pour évaluer l'intérêt des comparaisons radiométriques et géométriques entre images panchromatiques de dates différentes [BOUILLON 96].

Les méthodes développées comprenaient :

- un calcul de différence d'images après égalisation locale d'histogramme, et la mise en place d'un seuillage automatique du résultat,
- le calcul des sursols aux deux dates par les techniques proposées par Caroline Baillard, et leur comparaison.

La comparaison des sursols se montre de toute évidence intéressante pour la détection des nouveaux bâtiments. Elle conserve toutefois quelque difficulté dans la mesure où les points non corrélés ne sont pas les mêmes aux deux dates (et où il peut donc rester des zones indécidables). Cette technique, abordée dans la seconde partie du stage n'a pu être évaluée.

La différence radiométrique entre images a donné quelques résultats. Le bruit de détection est majoritairement constitué par les ombres. Un croisement avec les données issues de l'extraction de sursol pour éliminer ce problème a été étudié mais non implémenté. Une évaluation a été conduite par comptage, et donne, sur les paysages artificiels (de type pavillonnaire) un taux de sous-détection de l'ordre de 20% et un taux de sur-détection de l'ordre de 100% (chiffres calculés sur le thème bâti, pour une zone de travail comportant 68 nouveaux bâtiments ; les résultats moyens – tous thèmes confondus – sont un peu meilleurs).

De tels résultats ne sont donc bien entendu pas utilisables en tant que tels, mais pourraient contribuer à la décision au sein d'une procédure de détection de changement.

Comparaison entre modèles vecteur et image

L'essentiel de l'activité dans le cadre du sujet strict de la thèse a consisté en l'approfondissement de l'analyse en vue d'un choix de stratégie et de modélisation. Nous nous orientons vers une extraction indépendante de primitives 3-D (points et segments), que l'on tentera de qualifier par un indicateur de fiabilité reposant sur l'analyse locale de leur cohérence (et de leurs conflits). Ces données seront ensuite comparées à la base, tant au niveau de la position d'éléments clés (comme les angles de bâti, ou les arêtes dans une moindre mesure), qu'au niveau de la hauteur approximative des intérieurs des corps de bâtiment.

Cette démarche est conditionnée par la possibilité d'extraire et de qualifier des primitives de façon suffisamment dense. Quelques essais ont été conduits pour évaluer la robustesse d'un critère de cohérence fondé sur les seules contraintes photogrammétriques sur un jeu de points 3-D déterminé par la recherche de tous les maxima locaux symétriques du coefficient de corrélation linéaire calculé sur une fenêtre carrée.

Les résultats obtenus en zone urbaine sur des images à haute résolution (seize centimètres) sont encourageants [JAMET 96] : une sélection de l'ensemble de points cohérents le plus peuplé sur chaque ligne épipolaire permet de produire des MNT urbains statistiquement convaincants (zone test comportant quatre cents bâtiments : seul un immeuble de soixante dix mètres de haut a causé des erreurs importantes - les autres bâtiments étant bien corrélés). Cette expérience nous conduit à chercher une exploitation plus complète de la cohérence photogrammétrique dans le processus.

Travaux à venir

Les études sur la comparaison d'images à deux dates différentes seront reprises l'an prochain dans le cadre d'un axe indépendant. On y abordera l'utilisation d'images multispectrales et le calcul de caractéristiques locales, les comparaisons radiométriques directes étant inopérantes en paysage rural. Pour ce qui concerne la comparaison entre modèle vecteur et images, l'année 1997 sera centrée sur l'extraction de primitives 3-D, et abordera la modélisation formelle des interactions entre les observations extraites des images. La comparaison avec la base sera étudiée durant la dernière année.

Référence

[BOUILLON 96] A. Bouillon : *Détection de changements sur couples stéréoscopiques d'images aériennes*, rapport de DEA, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960027/C-STA, septembre 1996.

Publication

[JAMET 96] O. Jamet : *Comparaison d'un modèle à un couple d'images aériennes pour la détection des changements sur le thème bâti*, rapport interne, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960035/C-RAP, août 1996.)

C.1.6 Corrélation contrainte par modèle 3-D

Patrick Julien

La " corrélation contrainte par modèle 3-D " consiste à déterminer les dimensions et la position d'un objet – portion de terrain, maison, arbre– en optimisant la ressemblance entre deux orthophotographies établies à partir d'un modèle 3D de cet objet. La corrélation contrainte par modèle 3-D généralise la "corrélation par facettes" servant à restituer le relief, dans laquelle le modèle 3-D est un élément de surface parabolicoïde hyperbolique (choix actuel, justifié surtout par sa simplicité; mais on tire aussi parti, dans le calcul d'orthophotos, du fait qu'un p.h. est une surface réglée).

La corrélation par facettes, dont le prototype date d'environ deux ans, a reçu en 1996 des améliorations portant sur l'initialisation des facettes et sur le contrôle de la pente des facettes. Pour initialiser les facettes, on a remplacé la recherche exhaustive pour chaque facette par une méthode de propagation , sensiblement plus rapide. Quant au contrôle de la pente des facettes, il est apparu nécessaire dans le cas de paysages peu accidentés comportant de grandes plages de teinte uniforme; mais il sert aussi à l'autre extrême en paysage de montagne pour détecter les facettes cachées.

D'autre part, afin de contrôler la mise en place des couples de photographies, on a mis au point et intégré au programme interactif un outil de pointé manuel de repères de chambre (le principe est de superposer à l'image un repère graphique de forme, dimension et orientation ajustables), et un outil de pointé manuel de détails homologues (le principe est d'afficher deux images soit en superposition, soit en "clicnotement").

Enfin, on aborde actuellement (octobre) la restitution de maisons isolées, le modèle 3-D étant un parallélépipède avec un toit symétrique à deux pans (sept paramètres : x, y, L, l, orientation, hauteurs base et sommet toit).

C.1.7 Modélisation du terrain

On a incorporé au programme interactif GREX de "grille élastique" (principe dû à G. d'Autume), la possibilité de partir d'un échantillon de points quelconque, non placé sur un maillage ; cette option a été ajoutée notamment en vue d'utiliser la Base de données altimétrique – BDZ – comme initialisation de la corrélation par facettes. On a également incorporé des outils pour un tracé de bonne qualité de courbes de niveau ou d'ombrage sur imprimante-laser.

Par ailleurs, on a commencé une étude bibliographique et des tests relatifs aux surfaces B-splines triangulaires; ces surfaces, formées d'éléments polynômiaux, présentent la meilleure régularité pour un degré donné (classe $C_n - 1$ pour le degré n). Enfin le laboratoire MATIS a accueilli un étudiant de l'université Paris-6 pour un stage de DESS consacré à la modélisation du terrain par triangulation (pour la thèse de G. Gonçalves sur les qualités des MNT utilisés en cartographie, il y a un bilan séparé).

C.1.8 Qualités requises en modélisation numérique du relief

Gil Gonçalves

L'activité a consisté à mettre au point un programme de construction d'un MNT à partir des points des courbes de niveau et points cotés (cuvettes, cols et sommets).

En partant de cette information (points $\{X_i, Y_i, Z_i\}$) on cherche à construire une surface sur maillage carré. La surface est obtenue par la méthode de la "grille élastique" en minimisant la fonctionnelle quadratique :

$$E(z) = \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=1}^M (z_{i-1,j} - 2z_{i,j} + z_{i+1,j})^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=2}^{M-1} (z_{i,j-1} - 2z_{i,j} + z_{i,j+1})^2 + \sum_{i=1}^n p_i (H(m_i) - z_i) \text{ où le terme :}$$

E_{courbure} est un critère de régularité et représente la "courbure moyenne quadratique" :

$$E_{\text{courbure}} = \sum_{i,j} (z_{i-1,j} - 2z_{i,j} + z_{i+1,j})^2 + \sum_{i,j} (z_{i,j-1} - 2z_{i,j} + z_{i,j+1})^2 + \frac{1}{8} \sum_{i,j} (z_{i-1,j-1} - z_{i-1,j+1} - z_{i+1,j-1} + z_{i+1,j+1})^2$$

$E_{\text{échantillon}}$ contraint la grille à s'ajuster sur les points donnés (points de courbe, points cotés) :

$$E_{\text{échantillon}} = \sum_{i=1}^n p_i (H(X_i, Y_i) - Z_i)$$

où H est la fonction d'interpolation bicubique.

E_{courbes} exprime pour chaque point de courbe de niveau, que la tangente horizontale à la surface est la tangente à la courbe de niveau :

$$E_{\text{courbes}} = \sum_{i=1}^r [\vec{t}_i \times (\vec{N}_i \times \vec{K})]^2$$

où \vec{N}_i est la normale à la surface donnée, \vec{t}_i est la tangente à la courbe de niveau.

E_{points} exprime pour chaque point de cuvette, col ou sommet, que le plan tangent à la surface est horizontal :

$$E_{\text{points}} = \sum_{i=1}^s [\vec{N}_i \times \vec{K}]^2$$

$$E_{\text{points}} = \sum_{i=1}^s [\vec{N}_i \times \vec{K}]^2$$

λ, μ et ν sont des paramètres qui pondèrent l'influence de chaque terme.

Publications

[GONCALVES 96a] G. Gonçalves : *Qualités requises en modélisation numérique du relief: les problèmes à résoudre*, in 1/2 Journée Doctorants : Mini-Colloque en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960023/C-COM, 1996.

[GONCALVES 96b] G. Gonçalves : *Constructing digital terrain models from contour lines and morphologic points*, in III Euro-Conference en Systèmes d'Information Géographique, Madrid (E), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960024/C-COM, 1996.

[GONCALVES 96c] G. Gonçalves : *Aperfeiçoamento da qualidade de um MDT obtido a partir de curvas de nível e pontos cotados*, in Conferência de Cartografia e Geodesia. Lisboa (P), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960025/C-COM, 1996.

C.1.9 Groupement perceptuel pour l'analyse d'images aériennes

Olivier Dissard

Le groupement perceptuel est une méthode de groupement de primitives bas-niveau qui s'appuie sur la théorie de la Gestalt. Dans les faits, il s'agit de regrouper des chaînes de pixels contour, non forcément connexes, en s'appuyant sur des règles de continuation, fermeture, symétrie

Une première application du groupement perceptuel a été développée au laboratoire MATIS, dans le cadre de la restitution des bâtiments isolés : on recherche dans une image des formes rectangulaires par groupement, puis on calcule une élévation plane en y interpolant les résultats d'une corrélation d'images épipolaires.

Cette méthode a montré de grandes qualités de précision mais aussi des faiblesses, principalement dues au caractère purement géométrique du groupement (une fois les contours détectés, on oublie toute information de nature radiométrique ou stéréoscopique), ainsi qu'au manque de focalisation du processus : le modèle de bâtiment est simplifié et les paramètres sont très contraints pour éviter une explosion de la combinatoire, de plus la multiplication de structures parallèles au sol est source de sur-détections difficiles à éliminer.

Cette année nous avons focalisé nos recherches sur deux points:

— Utilisation d'informations radiométriques pour le groupement : pour extraire les pixels de contours, nous utilisons une image vectorielle des gradients de niveau de gris. Nous utilisons cette même image afin de calculer par descente de gradient, deux niveaux de gris moyens "à gauche et à droite" de chaque chaîne de contours. Cette information est ensuite utilisée dans la création des liens de groupement (continuation, parallélisme, angle) entre primitives; par ailleurs, le développement d'outils de segmentation de sursol, nous permet d'émettre des hypothèses d'altitude sur les segments, cependant, elle ne permet pas d'émettre plusieurs hypothèses d'altitude pour un même segment (facettes verticales). L'altitude la plus élevée est en principe privilégiée.

— Contraintes sur le groupement : deux types de contraintes (outre les contraintes géométriques et radiométriques) ont été utilisées, il s'agit des contraintes de focalisation: sélection et recherche de groupement à l'intérieur d'une zone d'intérêt - la plage de sursol -, et des contraintes photogrammétriques: utilisation de l'attribut d'élévation dans un processus de reconstruction stéréoscopique d'arête "à l'ombre" des bâtiments.

On reconstruit ici par groupement perceptuel la gouttière et le bord de l'ombre projetée, connaissant les orientations des deux images et la position du soleil [BOUSSAROQUE 96]. A ce niveau, aucune restriction sur la forme de l'objet à trouver n'est faite.

La suite de l'action sera consacrée à l'introduction d'autres types de contraintes : contraintes d'amorçage (utiliser les gouttières "à l'ombre" dans un processus de reconstruction de toiture); contraintes stéréoscopiques (élaborer un groupement parallèle sur les deux images stéréoscopiques); contraintes de forme (calquer un groupement de segments sur une forme vague, par exemple englobante); contrainte de modèle (la forme cherchée n'obéit plus à une forme vague, mais à un catalogue de modèles de formes faiblement paramétrées).

Publication

[BOUSSAROQUE 96] E. Boussaroque : *Sélection des arêtes "à l'ombre" de bâtiments*, stage de fin d'étude, EERIE, Promotion 1996, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960012/C-STA, 1996.

C.1.10 Reconstruction des bâtiments à partir d'un plan 2-D

Olivier Dissard

Le but de cette action est d'aborder la problématique de la reconstruction des bâtiments sur images à grande résolution (dix à vingt centimètres) à partir de données externes disponibles pour la plupart des grandes agglomérations françaises : leurs plans (ou bases de données) 2-D. Cette recherche a été conduite par Sylvain Damour.

Pour cela nous disposons cette année de deux images de résolution huit centimètres de Colombes (agglomération ouest-parisienne) rééchantillonnées en géométrie épipolaire, ainsi que de la base de données TRAPU, dont nous avons tiré la base de données 2-D.

La première étape a consisté à étudier les critères bas niveau qui permettent de recalcr les primitives 2-D sur les deux images du couple, en parallèle, par mesure "locale" (c'est-à-dire pour une seule primitive) puis par mesure "globale" (on prend la position qui maximise un gain sur l'ensemble des primitives qui constituent le bâtiment). Ces critères sont essentiellement basés sur l'étude des gradients de niveau de gris.

Les premiers résultats sont précis (erreur moyenne vingt centimètres en Z), le caractère global de la mesure rend le recalage robuste à la présence de pignons.

Toutefois, des cas d'échec dus au manque de contraste de bâtiments avec leurs contextes (les images de Colombes possèdent la particularité de ne pas posséder d'ombre, étant prises sous couvert nuageux) ont été répertoriés; nous n'avons pas fait à ce jour d'étude chiffrée sur le pourcentage de bâtiments recalés exactement.

La deuxième étape a consisté en une extraction de primitives à l'intérieur des toits afin d'y extraire leur forme. Un algorithme de recherche de trièdre à partir des angles des gouttières recalées a été développé.

Cette étude est à rapprocher de l'étude réalisée au laboratoire MATIS par C. Frisch et H. de La Grandière : pour chaque bâtiment un opérateur définit sa forme ainsi que celle de son toit (trois types de squelette I, L, T, deux types de pignon : I ou V). Les paramètres du modèle de toit sont calculés sur une étude de la plage de sursol d'un MNE (modèle numérique d'élévation), les gouttières étant quant à elles recalées d'après MNE puis avec un affinage sur les gradients, identique à celui pratiqué lors de la reconstruction 2-D - 3-D.

Références

[DAMOUR 96] S. Damour : *Reconstruction des bâtiments à partir d'un plan 2D, et Annexes*, rapport d'étude, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960034/C-RAP, septembre 1996.

[FRISCH 96] C. Fritsch et H. de la Grandière : *Reconstruction de bâtiments à partir d'images aériennes à grande échelle et de données stéréoscopiques*, stage d'option de l'École Polytechnique, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960029/C-STA, juillet 1996.

Systemes d'interpretation d'images aeriennes

Introduction

L'action "systèmes d'interprétation" a débuté en 1995 au laboratoire MATIS, elle vise à acquérir des connaissances sur ce domaine par l'intermédiaire d'actions ponctuelles sur les thèmes route et bâti et sur de l'imagerie aérienne dont la résolution varie de quarante à soixante quinze centimètres. Pour cela, nous sommes partis de traitements monothématiques développés auparavant au laboratoire MATIS (suivi de route, extraction et reconstruction de bâtiment isolé, restitution du relief par corrélation d'images), les avons analysés et avons défini des axes de recherches soit qui utilisent de la connaissance a priori (carte scannée, BDCARTO), soit qui élaborent une stratégie de coopération/mise en concurrence d'algorithmes thématiques.

De cette analyse sont nés quatre sujets :

— apport des bases de données vecteur pour l'interprétation d'images (thèse de Ghislaine Bordes) : de l'information supplémentaire provient de la BDCARTO, l'accent est mis sur la construction de la base de connaissances a priori, la modélisation des principaux acteurs du processus pour une stratégie d'interprétation est définie au début de la recherche; le but est la restitution des routes,

— apport des cartes scannées pour l'analyse de scène en imagerie aérienne : application à la détection du réseau routier (thèse de Philippe Guérin) : on reste ici dans le cadre de la restitution du réseau routier, l'interprétation de la carte scannée fournit un inventaire des objets à retrouver, l'accent est mis sur le contrôle du résultat opéré par le processus et sur l'enrichissement de celui-ci avec l'information provenant de l'interprétation de la carte,

— contrôle d'un processus d'extraction du réseau routier par interprétation locale du contexte, appliqué à la production de données (thèse de Renaud Ruskoné) : on part ici du suivi de route développé par Sylvain Airault. La détection des erreurs du suivi, leur analyse ainsi que l'analyse des causes d'arrêt sont faites à l'aide de spécialistes. L'accent est mis sur le développement de ces spécialistes et sur la stratégie qui contrôle leur utilisation (mécanismes de décision),

— collaboration d'algorithmes monoscopiques et stéréoscopiques pour la restitution du relief : une coopération entre d'une part des algorithmes de corrélation et d'autre part des algorithmes monoscopiques d'interprétation d'image permettra d'exploiter leurs complémentarités en progressant en parallèle dans la restitution du relief et l'interprétation de la scène. Cet axe comprend notamment le travail de thèse de Caroline Baillard.

Cette année voit se terminer les thèses de R. Ruskoné et Ph. Guérin, quant à la thèse de Ghislaine Bordes, elle devrait se terminer début 1997; aussi pouvons nous d'ores et déjà faire un bilan pour chaque action, une synthèse globale sur le thème "route" est prévue pour l'année prochaine.

C.1.11 Apport des bases de données vecteur pour l'interprétation d'images

Ghislaine Bordes

Cette thèse a débuté en octobre 1993, dans la continuité des recherches sur l'extraction du réseau routier. L'objectif général de cette recherche est d'évaluer l'apport de données externes pour l'interprétation d'images aériennes et en particulier pour l'extraction des routes.

Les données utilisées sont celles de la BDCARTO, leurs particularités sont leur précision de vingt mètres et la présence d'attributs intéressants pour l'analyse d'image (largeur de la route, nature de certains contextes étendus).

Au cours des deux premières années de thèse, nous avons défini une stratégie de détection de routes s'efforçant d'utiliser au mieux les informations fournies par la BDCARTO de manière à parvenir à un résultat d'interprétation suffisamment fiable (cf document [2]). Cette stratégie de détection s'appuie sur deux principes fondamentaux :

La détection des routes dans l'image est guidée par la BDCARTO

D'une part les zones de recherche de routes sont restreintes au voisinage des segments routiers de la BD, d'autre part on choisit le meilleur algorithme de détection de route à mettre en œuvre selon les attributs rattachés au segment de route dans la BD.

Les algorithmes de détection proposés dans un premier temps sont l'algorithme de suivi par homogénéité [AIRAULT 94], l'algorithme de suivi par profil [NICOLAS 95], l'algorithme de détection à résolution dégradée par chapeau haut-de-forme.

La détection est hiérarchisée

On recherche en priorité les segments routiers qui sont représentés de façon fiable dans la BD et qui sont facilement détectables dans l'image. Ces segments dits "faciles" sont ensuite utilisés pour guider la détection des segments moins fiables ou moins visibles.

Les connaissances nécessaires à la mise en œuvre de cette stratégie ont été acquises en 1995 et 1996. En 1995, nous avons notamment défini un modèle de prédiction de la fiabilité des tronçons routiers de la BDCARTO en fonction des attributs sémantiques de celle-ci.

Nous avons également défini et testé des indicateurs pictoriels permettant de confirmer la présence de la route dans l'image et de préciser son aspect. La fiabilité a priori des tronçons et les indicateurs pictoriels permettent d'ordonner les segments de la BD, de façon à commencer la détection par les plus faciles.

En 1996, nous avons étudié le paramétrage des différents algorithmes utilisés pour la détection des routes (algorithmes de suivi par homogénéité et par profil, algorithme du "chapeau haut de forme"...).

Cette étude est fondée sur des tests qualitatifs qui ont permis de mettre en évidence les paramètres les plus sensibles et de fixer les valeurs par défaut des autres paramètres.

Pour les paramètres sensibles, des tests statistiques sur différentes images ont conduit à écrire des règles de paramétrage des différents algorithmes en fonction des attributs des segments routiers et de leurs indicateurs pictoriels. D'autre part, grâce à des tests qualitatifs sur différentes images, et à des tests statistiques de l'efficacité des algorithmes de suivi en fonction des indicateurs pictoriels nous avons dégagé les règles de choix d'un algorithme en fonction des caractéristiques d'un segment routier (ses attributs, son contexte, ses indicateurs pictoriels).

Ces différents tests ont permis de construire un embryon de système mettant en œuvre la stratégie proposée. D'autre part, nous avons mis en place une méthode d'évaluation interne de la qualité des primitives routières sur des critères géométriques, radiométriques et par comparaison avec le segment routier de la BD auquel elles correspondent.

Les résultats obtenus sont assez satisfaisants pour des zones rurales, les fausses détections sont peu nombreuses, l'évaluation automatique de la qualité des routes détectées permettant de les éliminer. En ce qui concerne les zones plus complexes comme les zones urbaines ou les zones boisées, les résultats sont encore insuffisants, cette restriction est liée à l'inefficacité des algorithmes de détection dans ce type de contextes.

Toutefois, l'un des atouts de notre système est de pouvoir évoluer; des algorithmes plus spécifiques pourraient donc être proposés pour les contextes plus complexes.

Une solution de détection en zone boisée a été proposée dans [NORMANDIN], toutefois la fiabilité des résultats obtenus reste médiocre, cette solution n'a pour l'instant pas été intégrée au système.

Les derniers développements concernant la reconstruction du graphe routier à partir des primitives détectées et les tests d'évaluation quantitative des performances du système devraient être terminés en décembre 1996.

Références

[AIRAULT 94] S. Airault : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aérienne*, in Actes du congrès RFIA, vol. 1, pp. 519-531, Paris (F), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-940004/C-COM, janvier 1994.

[NICOLAS 95] S. Nicolas : *Extraction automatique du réseau routier par suivi de profil sur images aériennes numérisées*, rapport de stage d'Ingénieur en Télécommunications, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-950034/C-STA, juin 1995.

[NORMANDIN 96] F. Normandin : *Détection de routes sur images aériennes; application aux routes en forêt*, rapport de stage de fin d'étude d'ingénieur de l'INT, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960018/C-STA, juillet 1996.

Publications

[1] [BORDES 96a] G. Bordes, Ph. Guérin, G. Giraudon & H. Maître : *Contribution of External Data to Aerial Image Analysis*, ISPRS'96, Commission IV, Vienne (A), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960017/C-COM, juillet 1996.

[2] [BORDES 96b] G. Bordes : *Interprétation d'images aériennes guidée par une base de données cartographiques : Application à l'extraction automatique des routes*, rapport de présoutenance, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960007/C-RAP, février 1996.

C.1.12 Apport des cartes scannées pour l'analyse de scène en imagerie aérienne : application à la détection du réseau routier

Philippe Guérin

Dans ce travail, une analyse des mécanismes et des difficultés de l'interprétation automatique d'images aériennes est présentée, en la rapportant tout d'abord aux concepts de la photo-interprétation humaine. Pour surmonter les obstacles de l'analyse tout-automatique des scènes aériennes, les potentialités des cartes topographiques sont évoquées en tant qu'outil de compréhension de l'image. La spécificité des cartes topographiques est soulignée par rapport à d'autres sources d'informations externes et d'autres types de cartes.

En effet, chacune de ces sources de données a une *vocation* qui se traduit par des spécifications de contenu adaptées et un certain niveau de précision géométrique et sémantique. Pour connaître la nature et le contenu de la carte topographique au 1 : 25 000 de l'IGN, un inventaire des éléments caractéristiques de cette carte est constitué, de même qu'une évaluation de la qualité du thème routier.

Les résultats de cette étude ont montré l'adéquation entre le contenu de la carte et les spécifications attendues de restitution de l'image vis à vis de l'objectif recherché, l'acquisition de la BDTOPO.

Les déformations existantes entre la carte et le terrain nominal ont été caractérisées, tant au niveau des chaussées que des carrefours :

- estimation de l'amplitude des déplacements,
- comportement statistique des déformations,
- classification et hiérarchisation des configurations favorables ou non à un bon positionnement dans la carte.

Globalement, la précision géométrique sur les carrefours est de 9,5 mètres en écart-type et celle pour les arcs est de 5,2 mètres (valeur plus faible due à la méthode de mesure au plus proche voisin avec l'arc de référence).

En tenant compte de la qualité et de la précision des informations que peut apporter la carte topographique, le choix méthodologique d'emploi de la carte s'est porté sur une approche descendante (c'est-à-dire partant de la connaissance externe pour guider et contraindre les détections dans l'image).

Elle consiste à opérer un simple recalage du réseau routier de la carte dans l'image, sans remise en cause de la topologie initiale. Le problème de la détection des routes dans l'image revient à positionner le centre des carrefours et à ajuster le tracé des chaussées par un déplacement latéral de leur axe.

Ces deux actions de recherche (Remplacement des carrefours et Ajustement des chaussées) sont assurées par des opérateurs spécialistes. Leur lancement est contrôlé par un séquenceur. Une phase de prétraitement amorce le déroulement du système.

D'un côté, la carte est vectorisée pour extraire le graphe des routes. De l'autre, l'image aérienne subit une succession d'opérations pour mettre en valeur les traits caractéristiques des chaussées : homogénéité du revêtement (rehaussée par un lissage de l'image) et contraste des bords de la chaussée avec les surfaces avoisinantes (détection des lignes de fort gradient).

Le remplacement des carrefours par l'opérateur spécialiste est ensuite lancé. Les intersections sont des primitives complexes, sémantiquement riches, qui assurent au système un faible risque de fausses détections pour une configuration proposée par la carte. De plus, un carrefour détecté autorise le remplacement d'au moins trois chaussées par restitution de leurs extrémités.

Enfin, le spécialiste chaussée propage le recalage des arcs à partir des intersections détectées en intégrant des contraintes radiométriques et géométriques fortes. En sortie du système, on obtient un graphe corrigé des routes, les

arcs représentant l'axe médian de la surface visible des chaussées, les noeuds représentant le centre d'inertie de la surface du carrefour. L'emprise des chaussées et des carrefours est également disponible.

À partir du graphe recalé, des données initiales et d'un réseau de référence, une évaluation de la fiabilité des résultats obtenus par le système est opérée, afin d'assurer un contrôle réel sur les extractions.

Le module de contrôle et d'évaluation cherche avant tout à pouvoir entériner des extractions qualifiées de fiables, quitte à ne conserver qu'une portion réduite du réseau, mais dispensant à un opérateur humain de revenir sur le travail effectué par la machine. Ce contrôle passe par une analyse du déroulement du processus, et par une qualification aussi bien globale que locale des détections.

Publications

[BORDES 96a] G. Bordes, Ph. Guérin, G. Giraudon & H. Maître : *Contribution of External Data to Aerial Image Analysis*, ISPRS 96 Commission IV, Vienne (A), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960017/C-COM, juillet 1996.

[GUÉRIN 96a] Ph. Guérin : *Apport des cartes topographiques pour l'analyse de scène en imagerie aérienne*, in revue Géomatique, France, , IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960009/C-ART, 1996.

[GUÉRIN 96b] Ph. Guérin : *Apport des Cartes Topographiques pour l'Analyse de Scène en Imagerie Aérienne : Application à la Détection du Réseau Routier*, thèse de Doctorat de l'Université Paris-7, Denis, , IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960010/C-THE 1996.

C.1.13 Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données cartographiques

Ce travail décrit les bases du développement d'une méthode automatique d'extraction du réseau routier dans le cadre de la saisie et de la mise à jour de la BDTOP. Elle fait suite aux travaux de Sylvain Airault concernant le suivi de routes sur images aériennes possédant une résolution de quarante à soixante quinze centimètres.

Le système proposé repose sur une répartition contrôlée des connaissances de haut et de bas niveau. En effet, l'utilisation de procédures interprétatives implique de résoudre des conflits, de gérer des résultats imprécis et/ou incertains, de prévoir tous les cas problématiques... bref, d'employer des méthodes qu'il est impossible d'utiliser de façon globale sur toute une image. On utilise donc les connaissances de haut niveau pour résoudre des problèmes bien localisés après le suivi de route. La stratégie de déclenchement des processus d'interprétation locale est basée sur une analyse des causes d'arrêt du suivi de routes.

Cette extraction à deux niveaux sémantiques peut être qualifiée d'approche mixte :

- ascendante (guidée par les données) lors d'une étape d'extraction de bas niveau,
- descendante (guidée par le but) lors d'une étape de vérification du réseau extrait sur des critères de plus haut niveau. La phase de vérification est focalisée sur l'environnement immédiat de la route. Elle met en jeu des modules experts capables d'identifier un objet donné.

Nous proposons ici une solution d'architecture adaptée à l'extraction du réseau routier. Hormis les modules d'extraction (amorçage, suivi et reconstruction de réseau), nous nous sommes attachés au développement d'une phase de validation des objets "routes", notamment grâce à l'implémentation de méthodes originales de détection des carrefours et des véhicules. Finalement, une évaluation des résultats montre que plus de 60% des routes peuvent être identifiés par une telle approche pour un taux d'erreur inférieur à 20%.

Publications

[RUSKONÉ 96a] R. Ruskoné, L. Guigues, S. Airault & O. Jamet : *Vehicle Detection on Aerial Images : A Structural Approach*, in ICPR Proceedings, vol III, pp. 900-904, Vienna (A), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960014/C-COM, septembre 1996.

[RUSKONÉ 96b] R. Ruskoné & S. Airault : *Vers une Interprétation Automatique du Réseau Routier sur Images Aériennes; détection et Analyse des Carrefours*, in Revue Internationale de Géomatique, Hermès, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960015/C-ART, 1996.

[RUSKONÉ 96c] R. Ruskoné : *Extraction Automatique du Réseau Routier par Interprétation Locale du Contexte: Application à la Production de Données Cartographiques*, thèse de Doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960011/C-THE, 1996.

C.1.14 Collaboration d'algorithmes monoscopiques et stéréoscopiques pour la restitution du relief

Caroline Baillard et Olivier Dissard

Ce sujet a débuté fin 1994 au laboratoire MATIS. Il part du principe que pour restituer le relief des zones construites à partir d'images aériennes de résolution moyenne, il n'existe pas un algorithme idéal de mise en correspondance d'image, mais plusieurs algorithmes stéréoscopiques possédant leurs qualités et leurs défauts suivant le contexte de l'image.

L'objectif de ce travail est d'exploiter la coopération d'algorithmes monoscopiques et stéréoscopiques dans un processus de restitution 3-D de scènes péri-urbaines, s'affinant en précision, en caractérisation et en densité au fur et à mesure de l'intervention des algorithmes.

Plus précisément, on choisit de s'intéresser à l'analyse et à la restitution des plages de sursol (bâti et végétation), qui constituent à la fois des objets problématiques pour la restitution 3-D (discontinuités et parties cachées), et des éléments essentiels de la scène.

La détection individuelle de ces objets permet en outre de travailler localement, et d'éviter ainsi une combinatoire trop importante et ses conséquences ; on espère ainsi pouvoir réduire les erreurs d'interprétation, étendre l'ensemble des modèles et relâcher les contraintes sur les paramètres de forme.

Une première mise en correspondance des images fournit un modèle d'élévation grossier et non exhaustif mais qui possède l'avantage de préserver les discontinuités du relief (fréquentes en présence de murs verticaux), d'être peu bruité et suffisamment dense pour permettre l'extraction de premières zones de sursol [1].

Le travail de cette année a consisté d'une part à mettre au point la méthode d'extraction des zones de sursol, d'autre part, à étudier les différentes techniques pour les exploiter [2] (ce qui comporte une étude d'objets 3-D caractéristiques des zones construites et qui permettent d'affiner le relief).

L'extraction proposée s'applique aux données d'élévation non interpolées, et elle est capable de gérer les cas de sursols étendus, de terrains légèrement en pente et d'adjacence de sursols d'élévations différentes.

Une première application est la génération automatique de Modèles Numériques de Terrain (MNT), descriptifs de la surface topographique [3]. Les régions de sursol ainsi extraites définissent des régions d'intérêt dans les images.

Elles sont analysées localement afin d'affiner la restitution du ou des objets 3-D concernés :

— Analyse entropique locale des directions de gradient: elle indique la présence de structures linéaires. Le caractère local de la mesure permet de resegmenter la zone en régions structurées et non-structurées.

Analyse des régions de niveau de gris homogène des deux images du couple. Les régions sont appariées et pour chaque zone de sursol, un sous-ensemble de régions est sélectionné sur un critère monoscopique de linéarité des formes; des hypothèses de plans 3-D sont formulées.... Cette étape ainsi que la suivante sont actuellement en cours.

— Reconnaissance de formes géométriques par groupement perceptuel stéréoscopique de segments. Les segments possèdent deux attributs qui sont leurs niveaux de gris à droite et à gauche, calculés par descente de gradient sur les images en niveau de gris.

On cherche à les regrouper à l'intérieur de la zone d'intérêt de façon parallèle sur les deux images et à parallaxe quasi-constante.

Cette étude est aussi en cours. Par ailleurs des amorces de groupement sont données par l'étude d'Édouard Boussaroque [4]; il s'agit du bièvre: gouttière du toit "à l'ombre"/ bord de l'ombre.

Par la suite, une étude comportementale devrait permettre de définir des indices de qualité judicieux, et de mettre en évidence des classes d'objets spécifiques de ces deux dernières approches. On tentera alors de proposer une stratégie locale de résolution.

Référence

[4] [BOUSSAROQUE 96] É. Boussaroque : *Sélection des Arêtes "à l'ombre" de bâtiments*, stage de fin d'étude, EERIE, Promotion 1996, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR-960012/C-STA, 1996.

Publications

[1] [BAILLARD 96a] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Appariement stéréoscopique d'images aériennes en milieu péri-urbain*, RFIA'96, Rennes (F), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960006/C-COM, janvier 1996.

[2] [BAILLARD 96b] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Extraction and Characterization of Above-Ground Areas in a Peri-Urban Context*, IAPR/TC7 Workshop on Methods for Extracting and Mapping Buildings, Roads and Other Man-Made Structures from Images, Graz (A), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960019/C-COM, septembre 1996.

[3] [BAILLARD 96c] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Extraction of Above-Ground Areas and Application to DTM Generation in a Urban Context*, EUROPTO Conf. on Image and Signal Processing for Remote Sensing, Taormina (I), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960020/C-COM, septembre 1996.

C.1.15 Applications semi-automatiques d'aide à la restitution de la BDTOPO

Sylvain Airault

Cette action de recherche se situe dans le contexte de l'aide à la saisie initiale de la base de données topographique. Elle a pour objectif de conduire des études cherchant à évaluer le potentiel de méthodes développées par ailleurs dans le laboratoire ou d'en d'autres organismes de recherche.

Les améliorations à apporter aux méthodes étudiées ne sont plus guidées ici par le souci d'améliorer les résultats des traitements automatiques eux-mêmes mais par le souci de proposer une interaction efficace entre l'opérateur et les traitements, dans le but de rendre les méthodes utilisables en production.

Les moyens consacrés à cet axe de recherche ont été moins importants que prévus et ont consisté essentiellement en stages. Les problèmes abordés concernent principalement la reconnaissance du réseau routier et un stage a concerné la restitution interactive du bâti.

Portage du suivi de routes par SYSECA

Dans le cadre d'une coopération entre le laboratoire MATIS et SYSECA, notre algorithme de suivi de routes a été porté sous Géostéréo, environnement de saisie photogrammétrique développé par SYSECA et utilisé à l'IGN pour la saisie de la BDTOPO. Ce portage, qui a été réalisé par SYSECA, a nécessité une collaboration du laboratoire MATIS au niveau de l'analyse de l'intégration des algorithmes de suivi automatique dans l'environnement de saisie manuelle et au niveau d'une première définition de l'interface utilisateur.

Cette coopération avec SYSECA a donné lieu à deux publications communes [AIRAULT 96] et [LEYMARIE 96].

Intégration de contraintes externes dans l'algorithme de suivi de routes

Ce sujet a été abordé dans le cadre d'un stage [MORNAT 96]. Il s'agissait d'évaluer quel pourrait être l'apport de données externes pour contraindre l'algorithme de suivi de routes dans le cadre de son utilisation interactive.

L'utilisation d'une localisation approchée des routes permet de gérer des alertes lorsque le suivi s'écarte trop de la position estimée de la route mais également de réamorcer le suivi lors d'une interruption de la détection due à la présence d'un obstacle.

L'utilisation des données externes permet donc d'améliorer la détection automatique, tant au niveau de la fiabilité qu'au niveau de l'exhaustivité.

Recalage vecteur / image sur les carrefours

Ce sujet a été abordé dans le cadre d'un stage [GAUTHIER 96]. Il s'agissait d'évaluer l'apport de données externes pour la restitution des carrefours routiers. Une approche descendante a été proposée dans laquelle on cherche à dissocier autant que possible le problème du choix du modèle de carrefour à utiliser et le problème du recalage de ce modèle dans l'image.

La méthode a été appliquée à la restitution des carrefours simples (trois ou quatre branches sans terre-plein central) en mettant notamment en évidence la notion de route «principale», c'est-à-dire de route conservant ses propriétés radiométriques et géométriques à travers le carrefour.

Ce type d'approche doit être étudié plus finement et étendu au traitement des carrefours plus complexes dans le cadre d'une thèse débutant en octobre 1996.

Optimisation multi-critères pour la restitution semi-automatique des bâtiments simples

Le but de cette action de recherche était de faire un inventaire des critères bas-niveau à utiliser pour la restitution des bâtiments et de proposer une formulation du problème de la restitution comme l'ajustement d'un modèle 3-D (parallélépipède rectangle) dans l'espace des critères retenus.

Il s'agissait également d'évaluer dans quelle mesure l'opérateur peut lever les ambiguïtés les plus fortes grâce à une interaction simple. Ce travail a été abordé dans le cadre d'un stage [COINTEPAS 96]. Une méthode de recalage de modèle dans l'image a été développée. Elle utilise à la fois des critères monoscopiques (gradient dans chacune des deux images) et stéréoscopiques (corrélation).

La méthode ne donne de bons résultats que lorsque l'initialisation est suffisamment proche de l'optimum, exigeant une interaction assez forte.

Références

[COINTEPAS 96] Yann Cointepas : *Restitution semi-automatique de bâtiments dans des images aériennes stéréoscopiques*, rapport de stage du DEA Traitement des images et du signal, ENSEA, Cergy-Pontoise, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960028/C-STA septembre 1996.

[GAUTHIER 96] Pascal Gauthier : *Restitution automatique des carrefours simples sur des images aériennes*, rapport de stage du DESS d'Intelligence Artificielle de Paris-6, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960030/C-STA, septembre 1996.

Publications

[AIRAULT 96a] Sylvain Airault, Olivier Jamet & Frédéric Leymarie : *From manual to automatic stereoplotting : evaluation of different road network capture process*, ISPRS congress, Vienne (A), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960021/S-COM, juillet 1996.

[LEYMARIE 96] Frédéric Leymarie, Nicolas Boichis, Sylvain Airault & Olivier Jamet : *Towards the automation of road networks extraction processes*, GIS & Remote Sensing Data Management, Satellite Remote Sensing III, Taormina (I), IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960026/S-COM, septembre 1996.

[MORNAT 96] Jean-Jacques Mornat : *Intégration de contraintes externes dans un algorithme de suivi de routes*, rapport de stage de l'ENSTA, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN, SR-960032, juin 1996.

C.1.16 Étude préalable au passage en production d'outils semi-automatiques de saisie du réseau routier pour la BD TOPO

Sylvain Airault

Les recherches entreprises sur l'automatisation de la saisie du réseau routier à partir d'images aériennes permettent aujourd'hui d'envisager de passer en production une partie des outils.

En effet, de premières études menées en 1995 ont montré qu'il était possible d'augmenter légèrement la productivité (gain de 15% à 40% sur la saisie du réseau des routes revêtues) par l'utilisation interactive d'un algorithme de suivi automatique de routes sans dégrader la qualité géométrique du réseau extrait (environ un mètre d'écart-type entre une saisie semi-automatique et une saisie manuelle soit à peu près la même chose qu'entre deux saisies manuelles). Il s'agit maintenant de généraliser les évaluations en réalisant des tests sur un échantillon d'images plus conséquent avec des opérateurs habitués à la saisie traditionnelle.

Trois scénarios doivent être testés : saisie manuelle 2-D avec calcul automatique du Z, saisie semi-automatique avec l'outil de suivi de routes, utilisation du suivi de routes pour compléter un graphe extrait automatiquement.

Si tous les outils sont aujourd'hui disponibles sur des maquettes de saisie développées au laboratoire MATIS, les tests avec des opérateurs de la BDTOPO viennent seulement de débiter et il n'est pas encore possible d'avoir des évaluations quantitatives sur la qualité géométrique du réseau extrait et sur la vitesse de saisie.

Par ailleurs, les seuls tests réalisés pour l'instant concernent la mise en œuvre de l'un des scénarios à évaluer (utilisation du suivi de routes seul).

Publication

[AIRAULT 96b] Sylvain Airault : *Mise en production d'un processus de saisie semi-automatique du réseau routier pour la BDTOPO : conception fonctionnelle et définition de la réalisation*, rapport interne, IGN, DT, Service de la recherche, laboratoire MATIS, SR 960033/C-RAP, septembre 1996.

C.1.17 Equarrissage des bâtiments de la BDTOPO en vue des sorties cartographiques à grande échelle

Sylvain Airault

Les spécifications de saisie des bâtiments de la base de données topographiques de l'IGN n'imposant aucune contrainte angulaire entre les différents segments, ceux-ci présentent, lorsqu'ils sont dessinés à grande échelle, des défauts angulaires peu esthétiques.

Cette étude consistait à définir une méthode globale pour "équarrir" les bâtiments (c'est-à-dire à faire tendre les angles entre segments voisins vers des angles droits) tout en préservant les relations de parallélisme et d'alignement entre les différents objets de la base.

Le principe retenu consiste en une optimisation globale sous contraintes.

Les contraintes sont exprimées sous la forme de fonctions d'énergie et, en chaque point du graphe, on peut calculer une énergie potentielle sous la forme d'une combinaison linéaire des énergies correspondant à chacune des contraintes.

Le problème se résout alors en recherchant la position d'équilibre du graphe dans lequel chaque angle de bâtiment est considéré comme un point mobile, pouvant se déplacer sous l'effet des contraintes.

Les contraintes qui ont été modélisées sont les suivantes :

- contrainte "d'équarrissage" : cherche à faire tendre les angles proches de l'angle droit vers des angles droits.
- contrainte de "rappel" : tend à rappeler les points vers leur position initiale dans le but de trouver une solution globale qui dégrade le moins possible la qualité géométrique des données d'origine.
- contrainte de "parallélisme" : tend à préserver des relations de parallélisme entre un bâtiment et un autre ou entre un bâtiment et un objet quelconque de la base.
- contrainte "d'alignement" : tend à préserver des relations d'alignement entre deux bâtiments.
- contrainte "topologique" : tend à préserver la topologie initiale du graphe en empêchant les chevauchements entre objets.

La méthode proposée pour améliorer le rendu cartographique des données de la BDTOPO donne globalement satisfaction dans la mesure où elle répond aux exigences fixées : améliorer le rendu des formes en prenant en compte les relations entre objets, cela en dégradant peu la précision initiale des données. Cependant, l'analyse des résultats en terme de forme ne fait appel qu'à des observations qualitatives.

Il serait nécessaire, pour évaluer complètement la méthode et rechercher son paramétrage optimal, de se définir un jeu de référence et des mesures pour qualifier quantitativement le rendu des formes.

Publication

[AIRAULT 96c] Sylvain Airault : *De la base de données à la carte : une approche globale pour l'équarrissage de bâtiments*, in Revue Internationale de Géomatique, Hermès, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR-960036/S-ART, 1996

C.1.18 Extension à l'altimétrie de la méthode du contrôle linéaire

Philippe Hottier

Thèse Habib

La thèse de Habib [HABIB 97] a été soutenue le 16 janvier 1997.

Elle comporte deux parties :

1. La première, consacrée à l'évaluation par simulation de la précision altimétrique et planimétrique qu'on peut espérer obtenir avec un capteur spatial, type Spot, de résolution cinq mètres au sol. Les images ont été créées à partir de MNT-références (fournis sous forme de semis réguliers par la BDALTI ou la BDTOPO), calculés par nos soins et équipés d'une radiométrie naturelle (scannée sur clichés aériens au 1 : 30 000), ainsi que de données sur la configuration géométrique de la prise de vue spatiale; en corrélant ces images Habib recrée les MNT et les compare aux MNT-référence; la précision altimétrique est évaluée par l'ecmq_z (l'écart moyen altimétrique en z estimé sur un très grand nombre de points du modèle).

2. La précision planimétrique quant à elle, a été obtenue en implantant sur le MNT-référence un réseau de cibles très serré : sur les images créées par simulation une corrélation visuelle des cibles fournit leurs coordonnées xyz et donne la possibilité d'estimer l'exactitude planimétrique. Des MNT de type très différents (seul point commun : absence totale de sur-sol) plaine (Reims), plateau avec gorge (Grabasse), relief très accentué (Saint-Martin de Londres, Amplepuis) ont été ainsi étudiés.

Les résultats semblent indiquer une exactitude fort voisine de celle obtenue par la BDTOPO; ainsi l'ecmq_z s'étage entre 0,7 mètre (plaine) et 2,5 mètres (relief très accentué); ceci peut paraître surprenant vu la différence de résolution terrain (de l'ordre de soixante centimètres pour les clichés au 1 : 30 000 et de cinq mètres pour les images spatiales); une explication conjecturale peut être celle-ci : c'est le sur-sol résiduel (micro-relief, parfois saisonnier, hauteur de végétation...) qui grèverait les résultats de la BDTOPO....

L'idée la plus originale de la thèse est sans doute la notion "d'erreur de rendu" ou "erreur de reproductibilité" d'un semis régulier au pas p définissant un MNT.

Cette erreur de rendu qui peut s'apprécier localement en tout point d'un profil (il suffit de considérer les altitudes en quatre nœuds successifs) ou sur l'ensemble du semis permet de juger d'un aspect important de la qualité d'un MNT régulier au pas p : sa reproductibilité; elle donne en effet l'ordre de grandeur de l'écart entre deux MNT reconstruits au pas p à partir du même semis par des méthodes différentes.

Elle devrait être faible par rapport à l'exactitude propre du MNT; par exemple, si le producteur d'un MNT régulier au pas de vingt-cinq mètres annonce une exactitude de 1,5 mètre, il faudrait que partout l'erreur de rendu soit de l'ordre de 0,3 mètre (en moyenne quadratique); ce qui n'est actuellement nullement le cas quand le relief est accentué....

Cette notion repose sur l'idée très simple suivante : partant d'un semis de points xyz (régulier ou non), on ne peut à la fois obtenir un MNT régulier au pas p lisse partout et dont la moyenne soit localement minimale partout. L'erreur de rendu est nulle en terrain plat et constante sur un profil parabolique; elle diminue en moyenne comme le carré du pas. Il semble qu'elle permette de détecter aisément des sauts ou des ruptures de pente.

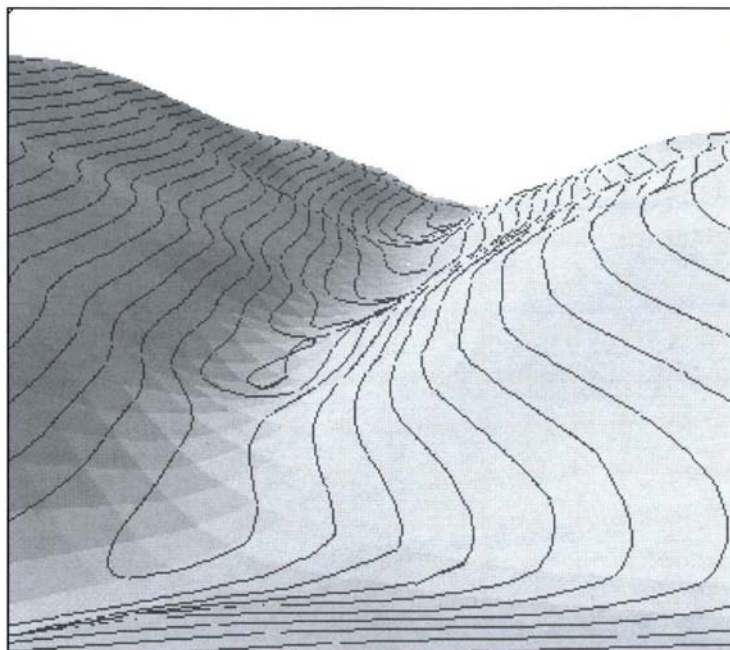


figure C.1.17.1

MNTA d'Amplepuis : point de vue à deux mètres au-dessus du sol (calcul à partir d'une numérisation des courbes de niveau saisies au 1 : 30 000. Pas de 50m; équidistance de 5m; erreur de rendu : 0,54m; erreur de rendu max : 3,53m.

Logiciel MNTA

La thèse Habib [HABIB 97] a conduit, entre autres, à écrire un logiciel très complet permettant de calculer et de manipuler un MNT sous un grand nombre d'options.

Ce logiciel écrit en Delphi 3, (Windows 95) très peu volumineux (il tient aisément sur une disquette) comporte les fonctionnalités suivantes :

- calcul d'un MNT au pas p à partir d'un semis quelconque de points xyz (actuellement limité à treize mille points; nombre de nœuds limité à cinquante dans chaque sens); calcul très court : quelques minutes. A l'issue du calcul on dispose d'une surface lisse, définie en chaque nœud par quatre données : altitude, dérivées premières en x et y, dérivée seconde croisée,

- calcul des lignes de niveau avec une équidistance donnée,

- estompage du MNT (hauteur et azimuth du soleil sont des paramètres),

- visualisation du MNT selon différents types de projection (centrale, axonométrique, aérienne, orthogonale); les coordonnées du point de vue sont paramétrables; le modèle peut tourner d'un angle quelconque autour de la verticale,

- possibilité de marcher sur le MNT : on choisit avec la souris son point de vue et son point principal,

- possibilité de zoom,

- possibilité d'avoir instantanément en tout point (souris) l'altitude et les coordonnées xyz; possibilité d'enregistrer une série de points du MNT; possibilité de localiser sur le MNT tout point défini par ses coordonnées planimétriques,

- possibilité de changer le pas du MNT; possibilité de changer le pas du sous-carreau de façon à améliorer l'aspect de l'image à l'écran; possibilité de changer les couleurs,

- possibilité de changer l'équidistance,

- possibilité de soustraire deux MNT : visualisation de la surface d'erreur et estimation (sur les carreaux intérieurs) de l'ecmqz,
 - possibilité d'estimer en tout point et sur l'ensemble du modèle l'erreur de rendu (moyenne quadratique et max),
 - possibilité de modeler un MNT (avec des données saisies sur cours d'eau); possibilité de visualiser un cours d'eau,
 - possibilité de saisir tout ou partie de l'écran en format .bmp.
- La philosophie retenue est en gros celle-ci : tout ramener au carreau.

Cependant des progrès restent à faire; il n'est pas sûr en particulier que la solution du MNT régulier soit la plus astucieuse; la modulation locale du pas (en fonction de l'erreur de rendu) pourrait être envisagée ainsi que le traitement de certaines discontinuités.

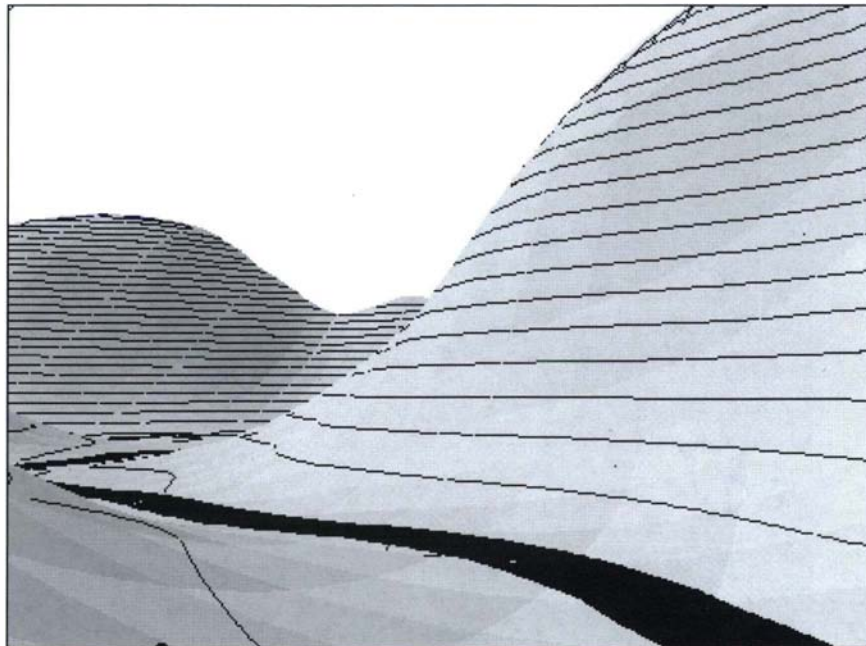


figure C.1.17.2

MNTa : vue à hauteur d'homme au fond de la gorge du Lamalou (St Martin de Londres. Origine semis BDALTI au pas de 50 m). Modelage à partir du cours d'eau saisi sur carte; pas = 50 m; équidistance = 5 m; erreur de rendu = 0,71 m; emax = 7,50 m.

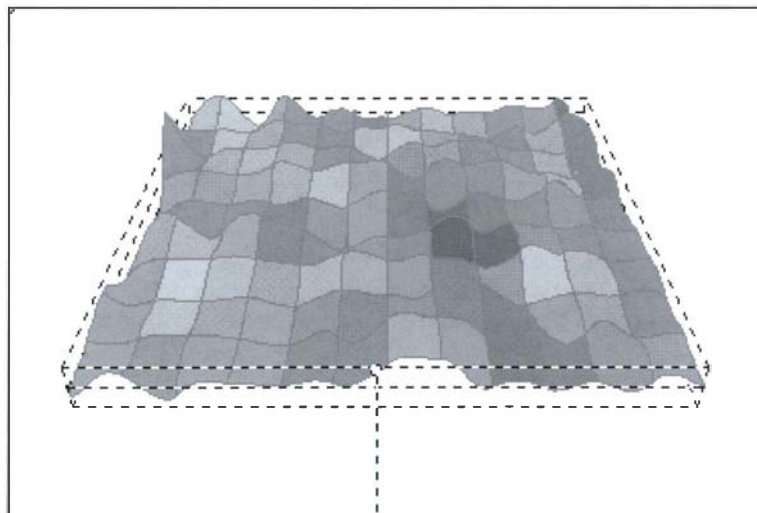


figure C.1.17.3

MNTa : soustraction de deux MNT d'Amplepuis (origine : deux restitutions en courbes de niveau au 1 : 30 000, à quelques jours d'intervalle). Ecmqz = 4,97 m; biais = 3,35 m; erreur max = 15,25 m; hauteur parrallélépipède circonscrit = 2 eqmqz).

Ce logiciel est disponible auprès de l'auteur «Hottier@ensg.ign.fr»

Contrôle linéaire

Le contrôle linéaire a été développé dans une thèse (ABBAS 94), pour répondre aux insuffisances du contrôle ponctuel quand il s'agit d'évaluer la qualité d'une saisie; les objets d'une carte ou d'une base de données sont souvent très complexes et la vision qu'en donne une base de données peut en apparence être fort éloignée de la réalité : il y a souvent généralisation consciente ou non; on néglige certains détails ou on les simplifie.

La méthode développée permet d'évaluer le taux d'accord du tracé-carte avec le tracé nominal et sur les tracés en accord d'estimer l'erreur moyenne quadratique planimétrique.

Dans une première phase de développement de la méthode, les parties en désaccord étaient coupées à l'écran (à l'aide d'une boule de tolérance, dont le diamètre est calculé à partir d'emq planimétrique *a priori* largement par excès); puis on estimait l'emq planimétrique sur les tracés en accord et on réitérait jusqu'à stabilisation.

L'estimation de l'emq sur les tracés en accord se fait grâce à l'outil distance de Hausdorff de deux contours; l'emq est estimée sur chaque paire de contours (carte-référence) par des formules du type :

$$\overline{\text{emq}} = \frac{d}{d_0} \text{emq}_0$$

où d est une composante de la distance de Hausdorff (par exemple la distance de l'objet carte à l'objet référence, c'est à dire le max des plus courtes distances des points de l'objet-carte à l'objet-référence) et d_0 la quantité analogue estimée à partir de couples d'objets simulés à partir du couple d'objets réels.

Une première amélioration a été apportée à la méthode en essayant d'atteindre à l'écran l'objet nominal à partir de l'objet référence : la référence en effet peut être inutilement compliquée et à la limite le taux d'accord du tracé-carte avec un tracé-référence nettement plus faible que l'accord du tracé-carte avec le tracé nominal, ce dernier étant défini comme un tracé d'exactitude infinie déduit du tracé réel en respectant les spécifications de saisie (par exemple on remplace une ligne brisée par une ligne droite etc....)

Dans le dernier développement, on propose l'automatisation de la phase de "régularisation" (atteinte de l'objet nominal et détection des détails discordants); on montre qu'étant donné deux contours K_1 (carte) et K_2 (référence), on peut à l'aide de deux outils très simples (la distance $\delta_1(s)$ d'un point de K_1 d'abscisse curviligne s , à K_2 .

Définition analogue côté référence et le coefficient de variation de ces distances ($Cv \delta = \Delta\delta/\Delta s$) on peut, tant côté carte que côté référence définir une typologie des détails anormaux : un détail carte est justement généralisé si sa longueur est limitée ($< l_{\text{max}}$), s'il possède à l'amont et à l'aval un coefficient de variation fort et si ses extrémités sont proches de K_2 ; un détail-carte est non appairable s'il est de longueur supérieure à l_{max} et s'il s'écarte brutalement de la référence sur une longueur appréciable; un détail carte est hors tolérance si ses points sont hors tolérance, et si, ou bien il est de longueur supérieure à l_{max} et à peu près parallèle à K_2 , ou bien il est court mais non généralisable.

Ces propositions ont été validées sur un chantier très difficile (cent quatre-vingt objets-bâti, centre Mulhouse, saisis au 1 : 30 000; référence 1 : 170 000) et sur un chantier beaucoup plus facile (BCARTO : cent quarante-quatre tronçons routiers; référence BDTPO). Le logiciel correspondant (écrit en Delphi1; fonctionne sous Windows 3.1) exige seulement les suites de sommets définissant chaque objet sur la carte et sur la référence. On peut se le procurer auprès de Philippe Hottier.

Publications

[ABBAS 94] I. Abbas : *Base de données vectorielles et erreur cartographique : problèmes posés par le contrôle ponctuel; une méthode alternative sur la distance de Hausdorff : le contrôle linéaire*, doctorat de l'Université Paris-7, ENSG-Sciences de l'Info. Géographique, IGN, SR- 940005/X-THE, soutenue le 10 juin 1994.

[HABIB 97] Habib : *Etude par simulation de la précision altimétrique et planimétrique d'un MNT (Modèle numérique de terrain) obtenu par corrélation d'images spatiales (capteur à balayage). Précision d'un MNT régulier - Erreur de rendu d'un semis régulier*, IGN, ENSG, soutenue le 16 janvier 1997.

C.2.1 Télémétrie laser satellite, nouvelle génération

par Michel Kasser

Contexte

Cette proposition de recherche prend la suite des travaux réalisés sur la télémétrie laser satellites au sein du laboratoire LOEMI, en collaboration étroite avec l'Observatoire de la Côte d'Azur (CERGA, Grasse), le CNES et l'INSU.

Elle intervient également à la suite des travaux menés il y a quelques années sur le prototype de télémètre laser terrestre Georan II, étudié au laboratoire LOEMI et abandonné depuis lors.

Disposant du savoir-faire nécessaire à la réalisation d'un dispositif de modulation/démodulation de faisceau permettant des mesures de distances totalement exemptes d'erreurs instrumentales, le laboratoire LOEMI a envisagé, en liaison avec d'autres équipes d'instrumentation SLR tant françaises (CERGA), qu'étrangères (NASA, IfAG), d'appliquer cette méthodologie au SLR.

À cette fin, une première étude a été lancée en 1995 au laboratoire LOEMI. Il en ressort un certain nombre de points déjà certains, et une série d'essais à effectuer d'ici la fin 1995, et en 1996.

Il est possible de procéder à une restitution d'orbite débarassée de tout biais de mesure sans changer de façon lourde la conception globale d'une station de télémétrie laser sur satellites.

Les modifications portent sur le laser (réglage différent des mêmes composants, études complémentaires à effectuer mais peu d'aléas *a priori*).

Objectifs

Les objectifs scientifiques sont centrés essentiellement sur la géophysique et la géodésie physique. L'enjeu est en effet de parvenir à mesurer des altitudes géocentriques absolues avec une précision millimétrique.

Après plusieurs décennies de mesures géodésiques de plus en plus efficaces et précises, nous savons aujourd'hui assez bien mesurer les composantes "horizontales" de tous les mouvements de déformation de l'écorce terrestre, mais pas la composante verticale avec suffisamment de précision.

Le problème posé est désormais de comprendre les mécanismes responsables des mouvements verticaux du sol, surrexion de chaînes de montagnes, subsidence de vastes provinces tectoniques. Ceci est impossible à aborder sans un outil donnant une altimétrie absolue de très grande précision.

Par ailleurs, une faiblesse considérable de toutes les techniques actuellement disponibles en nivellement de précision tient à leur aspect relatif, et à l'absence de toute référence verticale absolue.

Pour renforcer les réseaux actuels, la disponibilité d'une méthodologie (même géométrique pure et pas "géopotentielle") fournissant une telle référence serait essentielle.

Un autre besoin scientifique actuel, à mi-chemin entre les deux précédents, réside dans l'étude du niveau moyen des mers.

Il s'agit d'un enjeu majeur actuellement, ne serait-ce que pour évaluer l'impact d'un réchauffement climatique global.

Pour cela, une référence absolue d'altitude est indispensable, et son absence actuelle rend extrêmement difficile l'interprétation des données marégraphiques disponibles.

Activités - Résultats

Les travaux prévus en 1996 ont été considérablement retardés par la défaillance d'un fournisseur américain (Société Quantum) qui doit fabriquer le modulateur de faisceau laser nécessité pour tester le projet de nouvelle technologie.

Le travail effectué en 1996 a permis de choisir la configuration optique optimale en fonction des problèmes posés par la dépolarisation optique due aux rétroreflecteurs laser embarqués sur les satellites (travaux au laboratoire LOEMI de Bruno Goupil, en DEA MPT).

Il s'avère malheureusement que la modulation par polarisation ne pourra convenir et devra être remplacée par une modulation d'amplitude, beaucoup plus sensible aux bruits.

Cela ne remet pourtant pas en cause le procédé, les simulations initiales ayant été réalisées dans cette hypothèse défavorable.

Suites

Un des éléments-clés de ce nouveau concept en cours de test est le modulateur du faisceau laser. Celui qui a été commandé en septembre 1995 ne sera finalement pas livré.

Néanmoins nous espérons toujours trouver un fournisseur dans les mois qui viennent. Les tests ne commenceront donc qu'en 1997.

D'ici là, l'électronique de commande permettant de procéder aux essais au laboratoire LOEMI sera mise au point, en employant divers sous-ensembles déjà disponibles au laboratoire LOEMI; et l'ensemble optique destiné aux essais sera mis en place en utilisant le laser YAG du LOEMI (acquis sur la recherche SNEAP en 1994).

Donc au début 1997 commenceront les essais du modulateur : efficacité du système de modulation-démodulation, tenue au flux élevés, stabilité des résultats, conformité aux modèles développés en 1995. Il est prévu d'y consacrer le premier semestre 1997.

En parallèle, on étudiera le type de laser le mieux adapté à ce procédé, probablement de type injecté, à impulsion relativement longue (huit ns) et de forte énergie.

L'étape suivante, consistera à étudier les modalités pratiques d'installation d'un dispositif expérimental du même type sur la station de Grasse.

Nous étudierons alors les interfaces avec le matériel existant à mettre au point, et les différents problèmes mécaniques, électroniques et optiques à résoudre.

Après cette évaluation détaillée, il sera décidé ou non de l'opportunité de réaliser cette expérience prototype qui aurait alors lieu en 1998.

Référence

[GOUPIIL 96] B. Goupil : *Évolution des techniques de mesure par télémétrie laser sur satellites*, rapport de stage de DEA Méthodes physiques de la télédétection, Université Paris-7, Denis Diderot, IGN, SR-960011/L-STA, 9 septembre 1996.

Publications

[KASSER, GOUPIIL 96] M. Kasser & B. Goupil : *The polarization behaviour of cube corner retroreflectors used in SLR satellites*, Tenth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (China), IGN, SR-960007/L-COM, 11-15 novembre 1996

[KASSER, THOM 96] M. Kasser & Ch. Thom : *Proposition for a new SLR methodology using CW or long pulse LASERs*, Tenth International Workshop On Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (China), IGN-SR-960008/L-COM, 11-15 novembre 1996.

C.2.2 Métrologie laser aéroportée

par Christian Thom

Contexte

Il s'agit de notre participation à la mise en valeur du procédé breveté par l'IGN en 1990. Une partie des études a été financée par un contrat avec Elf-Aquitaine (contrat à frais partagés).

En 1993 nous avons validé une simulation numérique très complète du système projeté. Un contrat a été signé en octobre 1992 qui nous a permis de commencer le prototype du matériel embarqué et la réalisation de tests au sol. Un avenant en 1994 a permis de poursuivre le cofinancement. Cette étape a également nécessité l'achat d'un nouveau laser et d'un système informatique embarquable.

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

Ce travail a fait l'objet de la thèse de Olivier Bock depuis 1994 qui doit être soutenue à la fin de l'année 1996 [BOCK 96].

Objectifs

Cette nouvelle méthode de mesure doit permettre d'évaluer des variations de position et notamment d'altitude de l'ordre du millimètre sur des surfaces importantes, en des points équipés de rétrorélecteurs laser.

Ceci se révèle particulièrement important sur des zones d'extraction de fluides comme le pétrole ou le gaz, où les phénomènes de subduction sont symptomatiques de variations de contraintes dans le sous-sol.

L'originalité de la méthode réside dans la simplicité de son instrumentation : mis à part le laser picoseconde, classique en télémétrie laser mais relativement délicat à embarquer en avion ou en satellite, la détection compose simplement d'une photodiode de grande surface active, sans optique, d'un amplificateur large bande - faible bruit et d'un oscilloscope numérique rapide.

La mesure simultanée d'au moins quatre distances (nécessaires pour localiser précisément l'avion et apporter une information sur le réseau de prismes) se fait grâce à la divergence importante du faisceau laser, obtenue par une lentille ou un dépoli. La très bonne précision du procédé est obtenue grâce à un traitement du signal numérique avant l'optimisation.

Activités - Résultats

Les travaux de cette année ont été consacré à l'exploitation des données obtenues lors des missions de test de l'instrumentation de 1995 sur le terrain, à Combs-la-Ville, dans la région parisienne.

Il a été nécessaire, pour bien interpréter les résultats, de faire toute une chaîne de simulation pour pouvoir analyser l'effet de chaque paramètre opérationnel sur la précision finale du résultat. Nous disposons donc maintenant d'un outil puissant de compréhension des phénomènes influant sur le processus.

Au final, les résultats sont tout à fait satisfaisants, et une précision de quelques millimètres a été obtenue à Combs-la-Ville, dans des conditions pourtant très défavorables, et cette précision est conforme aux prévisions apportées par la simulation. Une autre grande partie des travaux a été la rédaction du mémoire de thèse d'Olivier Bock.

Référence

[BOCK 96] O. Bock : *Étude d'un système de télémétrie laser aéroporté sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol. Étude de l'adaptation du procédé à un véhicule satellitaire*, thèse de doctorat de l'Université Denis Diderot, Paris-7, IGN, SR-960004/L-THE, 12 décembre 1996.

Publications

[BOCK et al 95] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & Fourmaintraux : *Development of a new airborne laser subsidence measurement system, aiming at mm-accuracy*, au Fifth International Symposium on Land Subsidence, FISOLS'95, La Haye (NL), IGN, SR-950001/L-COM, octobre 1995.

[BOCK et al 96a] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & J. Pelon : *Ranging performance evaluation of the wide-angle laser ranging system*, IEEE Tr. on Geoscience and Remote Sensing, IGN, SR-960009/L-COM, 1996.

[BOCK et al 96b] O. Bock, M. Kasser & Ch. Thom : *A Wide Angle Airborne or Spaceborne Laser Ranging Instrumentation for Subsidence Measurement*, Tenth International Workshop On Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (China), 11-15 novembre 1996, IGN, SR-960010/L-COM, 1996.

Base de données géographiques

C.3.1 Base de données multi-échelles

Laurent Raynal

Contexte - Objectifs

L'objectif de cette recherche consiste à regrouper dans une même base de données des informations à des échelles différentes, afin de permettre une navigation entre les différents niveaux de détail. Il faut donc intégrer les schémas des bases de données et apparier les données.

Activités - Résultats

Cette année, un processus d'intégration de bases de données géographiques a été défini, il est composé de trois étapes [SPACCAPIETRA et al 96].

— La première étape, appelée pré-intégration, inclut toutes les activités préliminaires dont le but est la convergence des schémas vers un modèle uniforme.

— La deuxième étape consiste à déclarer manuellement toutes les correspondances et tous les conflits entre les schémas des bases d'origine en utilisant des liens de correspondance. Dans cette étape, un appariement des données à l'aide d'informations géométriques, topologiques et sémantiques est réalisé.

— Enfin, la dernière étape s'attache à résoudre les conflits et fusionner les schémas.

Le résultat de cette intégration est, soit une base de données fédérée si les données intégrées sont sur un réseau, soit une base de données centrale issue du transfert des données des bases d'origine.

La faisabilité de ce processus a été testée à l'aide d'une maquette de base de données multi-échelles routières. Elle a été réalisée à partir de deux jeux de données de l'IGN (la BDCARTO et GÉOROUTE) sur la zone de Marne-la-Vallée (trois cent soixante sept kilomètres de routes pour la BDCARTO et neuf cent quatre vingt onze kilomètres de routes pour GÉOROUTE, zone avec un réseau dense et varié). Cette maquette a été développée sur Géo?. La base de données centralisée obtenue s'appuie sur les liens de correspondance. Ces liens de correspondance relient deux ensembles d'éléments (types, classes ou objets) représentant le même phénomène du monde réel et portent la séquence des opérations multi-échelles nécessaires pour passer d'une représentation à une autre.

Ces premiers tests ont démontré qu'il était possible de réaliser des bases de données multi-échelles à partir de plusieurs jeux de données existants, mais ils révèlent aussi que le processus doit encore être perfectionné et généralisé. Pour cette raison, un état de l'art sur l'appariement a été réalisé [LEMARIÉ 96] [LEMARIÉ, RAYNAL 96] et durant le deuxième semestre, un travail sur l'amélioration de l'appariement a été réalisé avec un stagiaire de DESS [AREIA 96]. Ce travail consiste à prendre en compte de nouvelles informations sur le réseau routier (appartenance des tronçons à des routes, sens de la circulation, plus court chemin, graphe de communication...) pour déterminer les éléments à apparier. De même au niveau du schéma, une étude plus en profondeur est en cours sur le processus d'intégration [FERREIRA 96]. Chaque étape du processus est reprise en détail. Ainsi, afin d'affiner la déclaration des correspondances, une taxonomie des conflits est en cours de réalisation. Cette classification permettra de définir des liens de correspondance plus précis et de décrire des conflits plus complexes que ceux décrits pour l'instant.

Perspectives

L'année 1997, devant clore cette recherche, sera consacrée à l'approfondissement et à la généralisation du processus d'intégration afin de résoudre les difficultés spécifiques à l'intégration de base de données géographiques. La définition de nouveaux outils de manipulation de base de données multi-échelles pourrait faire l'objet d'une nouvelle action de recherche en 1998.

Références

- [AREIA 96] R. Areia : *Base de données multi-échelles, amélioration de l'appariement entre le réseau routier BDCRTO et la BDRoutière*, mémoire de DESS AIST, Université Paris-6, Pierre & Marie Curie, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960029/S-STA, octobre 1996.
- [FERREIRA 96] P. Ferreira : *Intégration de schémas de données géographiques orientés objet à différentes échelles*, mémoire de DEA SIG, Université Paris-7, Marne-la-Vallée, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960033/S-STA, septembre 1996.
- [LEMARIÉ 96] C. Lemarié: *État de l'art sur l'appariement*, rapport technique, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960022/S-RAP, 1996.
- [SPACCAPIETRA et al 96] Stefano Spaccapietra, Christine Parent & Thomas Devogele : *Conflicts in Spatial Database integration, Parallel and Distributed Computing Systems*, 25-27 septembre 1996, Dijon (F), IGN, Service de la recherche, laboratoire COGIT, SR-960038/S-COM, septembre 1996.
- [SPACCAPIETRA et al 98] Thomas Devogele, Christine Parent & Stefano Spaccapietra : *On Spatial Database Integration*, soumis à IJGIS'98, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-980001/S-COM, 1996.

Publications

- [LEMARIÉ, RAYNAL 96] C. Lemarié & L. Raynal : *Geographic Data Matching : First Investigations for a Generic Tool*, in Actes GIS/LIS'96, Denver, CO (USA), pp. 405-420, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960036/S-COM, novembre 1996.
- [DEVOGELE et al 96a] Th. Devogele, J. Trevisan & L. Raynal : *Designing and Producing a Multi-Scale Database from Mono-Scale Databases*, Geoinformatics'96, Palm Beach (USA), in Actes pp. 14-25, IGN, Service de la recherche, laboratoire COGIT, SR-960014/S-COM, avril 1996.
- [DEVOGELE et al 96b] Th. Devogele, J. Trevisan & L. Raynal : *Building a Multi-Scale Database with Scale-Transition Relationships*, Spatial Data Handling, Delft (NL), in Actes pp. 6.19-6.33, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960018/S-COM, août 1996.
- [DEVOGELE et al 96c] Th. Devogele, J. Trevisan & L. Raynal : *Processus de constitution d'une Base de Données Multi-Échelles*, in Revue Internationale de Géomatique, vol 6, n° 2-3, Hermès, pp. 249-263, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960019/S-ART, 1996.

C.3.2 Formalisation de la précision géométrique linéaire

François Vauglin

Contexte - Objectifs

L'action de recherche présentée ici a été menée à temps complet pendant trois années. Son objectif initial était la modélisation de la précision géométrique dans les bases de données géographiques. À partir de cette définition large, un sujet de thèse mieux cadré a été fixé, et une modélisation du comportement statistique de la précision géométrique linéaire a été proposée.

Ces travaux s'inscrivent dans le contexte de la recherche sur la qualité des données qui s'est intensément développée au niveau international ces dernières décennies, et au niveau national ces dernières années.

L'information géographique numérique est saisie lors de processus complexes dont une étape préliminaire est la modélisation de la géométrie de l'information saisie : on représente la géométrie de tous les objets par des points, des polygonales (ou polygones), et des polygones. Il découle de cette modélisation une caricature des objets du monde physique au détriment de certaines caractéristiques de forme et de position. De plus, toute chaîne de production contient certains petits défauts - souvent inévitables. L'ensemble a pour conséquence une certaine incertitude de positionnement qu'on cherche à modéliser.

L'approche adoptée doit permettre de connaître ou de modéliser l'évolution de la qualité après une mise à jour de données, ou plus généralement après une modification quelconque des données. Il s'agit donc de modéliser le comportement de la précision de positionnement et de savoir propager le modèle obtenu au travers d'opérations diverses s'appuyant sur la géométrie, comme des calculs d'intersections, des combinaisons, des superpositions de jeux de données, des calculs de longueurs, de surfaces, d'angles, etc.

Cette action de recherche a coïncidé avec le projet "Qualité des bases de données", et la mise en place des travaux de contrôle qualité à la BDTOPPO, à la BDCARTO et à GÉOROUTE, ainsi que la conduite de différents tests sur la géométrie des mêmes bases de données. En dehors de l'IGN, la collaboration la plus suivie concerne le Programme National de recherche sur les SIG (PSIG) d'une part, et la recherche internationale d'autre part, dont certains spécialistes reconnus (Nicholas Chrisman, Michael Goodchild).

Activités - Résultats

On travaille donc sur l'information géométrique linéaire. Les études menées jusqu'ici se sont efforcées de produire un modèle statistique d'erreur en agrégeant les mesures d'écart géométriques et en les ajustant aux lois de répartition classiques. On obtient alors un formalisme constant : une somme de loi normale et de loi exponentielle symétrique. Ce résultat est suffisamment général pour être retrouvé sur une large gamme de niveau d'agrégation des mesures : de quelques objets au lot de données.

La mesure utilisée permet de connaître l'écart géométrique en tout point des polygonales. Pour les objets dont la géométrie est à tendance fractale, la relation de cet écart à l'abscisse curviligne prise le long de la polygonale a été fournie. Pour la plupart des autres objets, la précision aux points intermédiaires est relativement comparable à celle d'un point quelconque de la polygonale; mais il existe une corrélation locale des écarts parfois assez marquée. Cette propriété n'a pas été validée sur le bâti.

La description statistique des écarts a été proposée sous trois formes mathématiques différentes dont l'équivalence a été prouvée. La forme la plus naturelle au vu de la mesure employée est une loi de densité de probabilité de présence. Les deux autres formes sont une loi d'espérance des écarts transversaux et un variogramme des écarts. Les règles de transformations entre les paramètres de ces différents modèles existent.

Perspectives

Si la démarche proposée peut-être directement appliquée pour les objets ponctuels ou linéaires, le cas des objets surfaciques est beaucoup plus complexe et nécessite de définir une mesure adéquate des écarts surfaciques avant de proposer une modélisation statistique de ces écarts.

Une étude analogue pourrait alors avoir lieu. Dans cette optique, une distance surfacique a été proposée et son étude doit être conduite en 1997. Pour l'instant, on peut se contenter de considérer les objets surfaciques comme étant définis par leur contour et d'appliquer à ces derniers les techniques développées pour les objets linéaires.

L'étude a porté principalement sur les polygonales. Si elle est la plus fréquemment rencontrée, cette modélisation de la géométrie des objets linéaires n'est pas la seule existante. Il serait intéressant d'examiner le comportement de la précision géométrique lorsqu'on utilise des modélisations de la géométrie réputées meilleures, comme par exemple des arcs de cercle ou de cubiques pour les routes, ou lorsqu'on utilise d'autres représentations de la géométrie, en fréquences par exemple.

Une autre piste d'étude à approfondir concerne les rapports entre la précision géométrique relative et absolue. Le modèle proposé - sous sa forme de variogramme - est probablement adapté pour cette étude.

Une autre difficulté vient des problèmes d'échantillonnage : la méthode développée part de mesures pour en faire une modélisation statistique. Dès lors, comment s'assurer de la validité du modèle sur des extrapolations en dehors de l'échantillon de mesure ? Ce point fondamental soulève les délicats problèmes de la régionalisation de la qualité de l'information géographique numérique, des échantillonnages, et des sondages. L'étude de fond reste à entreprendre.

Références

- [ABBAS 94] Y. Abbas : *Base de données vectorielles et erreur cartographique : problèmes posés par le contrôle linéaire ponctuel; une méthode alternative, sur la distance d'Hausdorff : le contrôle linéaire*, thèse de doctorat de l'Université Paris-7, ENSG, Sciences de l'Information, IGN, Saint-Mandé, SR-940005/X-THE, soutenue le 10 juin 1994.
- [ACI 96] : *Elements of Spatial Data Quality, rapport de la commission Data Quality de l'Association Cartographique Internationale*, J. Morisson & S. Guptill Eds, 1996.
- [DE LA LOSA et al 96] : urélie Bouillon, Arnaud De la Losa & François Dubreuil : *Calcul de variogramme sur des couples de polygones*, projet d'option IT2, IGN, École Nationale des Sciences Géographiques, 22 mars 1996.
- [MERKITOS 94] : *Marine geodesy*, vol. 17 n°4, 1994.
- [PrEn 12160] *Projet de norme européenne du CEN sur la qualité des données géographiques numériques*, (actuellement soumis à enquête publique).
- [PULLAR 91] : *Spatial overlay with inexact numerical data*, Auto Carto 10, technical paper 1991, ACSM ASPR, Annual convention, vol. 6, 1991.
- [RAVEL 96] Benoît Ravel : *Modélisation des imprécisions géométriques dans les bases de données géographiques : Propagations*, stage ENSAE 2ème année, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960034/S-STA, 1996.
- [YOUSFI 96] Khalid Yousfi : *Mesure de la précision dans les bases de données géographiques*, stage de 3e année de l'IAV Hassan II, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960043/S-STA, 1996.

Publications

[VAUGLIN, YOUSFI 96] : Mesure de la précision dans les bases de données géographiques, article publié dans la revue de l'ANITOPS, Maroc, IGN-SR-960007/S-ART, 1996.

[VAUGLIN 96a] François Vauglin : *La qualité géométrique : un état, des concepts, des outils*, ENSG : cours de DEA SIG, IGN-SR-960004/S-ENS, février 1996.

[VAUGLIN 96b] : François Vauglin : *Probability Assessments for the Use of Geometrical Metadata*, GISDATA'96 Summer Institute, Berlin (D), IGN-SR-960021/S-COM, juillet 1996.

[VAUGLIN, HARVEY 96] : Francis Harvey & François Vauglin, *Geometric match processing: applying multiple tolerances*. 7th International Symposium on Spatial Data Handling, Delft (NL), IGN-SR-960001/S-COM, août 1996.

C.3.3 Placement automatique des noms sur une carte

François Chirié

Contexte - Objectifs

Dans le cadre de l'automatisation de la production des cartes à partir des bases de données géographiques, l'objectif du laboratoire COGIT est de fournir un placement automatique de la majeure partie des écritures de la carte, avec une bonne qualité cartographique.

Rappelons que l'approche procédurale et algorithmique retenue vise à :

- déterminer des positions possibles pour le nom,
- quantifier la qualité cartographique des positions possibles. Cette quantification résulte d'une modélisation des règles cartographiques régissant le placement des écritures,
- choisir la meilleure position pour chaque nom, en optimisant ces quantifications.

Activités - Résultats

En 1996, la recherche s'est poursuivie selon trois axes : développement d'un programme destiné au placement des noms de rues, poursuite du développement de l'algorithme de placement des noms d'objets linéaires (voir article de M. Barrault, page 45), et amélioration du programme existant de placement automatique des noms horizontaux.

Le placement des noms de rues obéissent à des règles dont certaines sont spécifiques aux plans de ville. Il était donc nécessaire de développer un programme plaçant les noms de rues, différent de celui plaçant les noms des autres objets linéaires.

Les noms de rues étant pour la plupart placés à l'intérieur des rues, ce programme ne se préoccupe pas de minimiser l'écrasement de l'information cartographique par les écritures, contrairement aux autres cas d'écritures traités par le laboratoire COGIT.

Notre programme modélise les cinq règles cartographiques suivantes : les mots ne mutilent pas de carrefour si possible; un nom occupe les deux tiers de sa rue; les mots ne sont pas trop courbés; le premier et le dernier tronçon d'une rue sont désignés par son nom (autrement dit, le nom intersecte ces deux tronçons); les intermots d'un nom sont aussi égaux que possible.

La première difficulté provient de l'aspect combinatoire du problème. Les positions possibles d'un nom sont obtenues en faisant glisser suivant un pas chaque mot du nom le long de la rue. Or, à cause de la nécessité de respecter les quatre autres règles cartographiques ci-dessus, les intermots ne peuvent en général pas être égaux entre eux.

Pour un nom de N mots, les positions possibles sont donc déterminées par N paramètres variant indépendamment : l'abscisse curviligne du début du nom, et les (N-1) intermots.

Chaque paramètre pouvant prendre parfois plusieurs centaines de valeurs, certains noms peuvent avoir plusieurs millions de positions possibles, ce qui fait exploser les temps de calcul. Il a donc fallu optimiser, et réduire la latitude de glissement le long de la rue des noms dont le nombre de positions possibles est trop élevé.

Une autre difficulté est que, pour quantifier la qualité de chaque position possible, il faut combiner les cinq quantifications modélisant les cinq règles cartographiques ci-dessus. Les pondérations optimales de cette combinaison ne sont pas évidentes à déterminer.

Les positionnements obtenus par un essai de notre programme sur la ville de Nantes ont été examinés par des

cartographes, qui ont évalué à 80% les bons placements.

Comme pour les autres programmes du laboratoire COGIT, le pourcentage restant doit être corrigé ou placé interactivement.

Ces résultats permettent d'envisager une industrialisation de ces recherches.

En parallèle à ces recherches, des stages ont été réalisés :

- amélioration de la qualité du placement des noms horizontaux au 1 : 25 000 [TREVISAN 96],
- prise en compte de la projection cartographique pour les noms horizontaux [BLAQUIÈRE 96],
- pour la Top100, sur une carte au 1 : 100 000, essai de placement automatique des noms horizontaux, combiné avec le placement automatique des numéros de route [VADIN 96],
- début de combinaison du placement des noms horizontaux avec le placement des blasons [CHOUADRA 96].

Perspectives

Le programme de placement des noms des objets linéaires a produit des premiers résultats encourageants, et aboutira à une version définitive en 1997.

Il reste en outre au laboratoire COGIT à effectuer des recherches sur l'agencement global du positionnement (prise en compte de la densité), et sur le placement automatique des noms à disposition d'objets surfaciques.

Références

[BLAQUIÈRE 96] D. Blaquièrre : *Placement automatique des toponymes en tenant compte de la projection*, rapport de stage IT3 - DESS de cartographie numérique, IGN-SR-960011/S-STA, soutenu le 13 mai 1996.

[CHOUADRA 96] M. Chouadra : *Placement automatique des blasons, compte-rendu des modifications à effectuer dans le programme PAT*, rapport de stage DESS-AIST, IGN-SR-960037/S-STA, 1996.

[TREVISAN 96] J. Trévisan : *Amélioration de la qualité du placement automatique des toponymes*, rapport de stage, IT3 - DESS de cartographie numérique, IGN-SR-960010/S-STA, soutenu le 13 mai 1996.

[VADIN 96] M. Vadin : *Placement automatique des écritures sur la Top100*, rapport de stage IT3, DESS de cartographie numérique, IGN-SR-960012/S-STA, soutenu le 13 mai 1996.

Généralisation

C.3.4 Généralisation automatique : recherches avec une approche à base de connaissances

Anne Ruas

Contexte - Objectifs

Cette action de recherche a débuté en 1993 et s'est achevée fin 1996. Son objectif est d'étudier les problèmes de généralisation contextuelle, i.e. toute opération de généralisation qui requière l'analyse d'un ensemble d'objets.

Ces recherches ont pour objectifs d'automatiser le processus de généralisation en appliquant localement des traitements adaptés. Si on fait une analogie avec la généralisation manuelle, il faut disposer d'outils d'analyse multi-niveaux qui permettent de détecter les situations où une généralisation est indispensable (i.e. l'œil du cartographe), et une base de connaissance qui permette de choisir, aux vues de chaque situation, la démarche de généralisation la mieux adaptée (i.e. connaissances et expériences du cartographe) et des outils de validation qui permettent de vérifier l'état des données généralisées (i.e. l'œil du cartographe).

Afin d'optimiser nos recherches, nous nous sommes limités à la généralisation de données urbaines de la BDTOPO. Nous nous sommes concentrés sur trois opérations typiquement contextuelles : la sélection, l'agrégation et le déplacement.

Les autres opérations de généralisation sont étudiées dans les autres actions de recherche : *Généralisation cartographique algorithmique* (pages 131-132), *Modélisation mécanique pour la généralisation* (pages 132-133) et *Maquette de généralisation* (pages 133-134).

La première tâche fut de développer une plate-forme de recherche adaptée à nos contraintes : nous avons donc construit *Stratège*, un SIG dédié à la généralisation à partir d'un SGBD Orienté-Objet (Smeci de la société ILOG) muni d'un langage à base de règles.

L'orienté-objet nous permet de développer des structures d'analyse beaucoup plus riches que celles disponibles dans les SIG classiques.

Le système à base de règle nous permet d'optimiser le choix des objets à traiter, et de représenter des raisonnements plus sophistiqués et modifiables de façon dynamique.

Trois thèses sont réalisées dans le cadre de cette action de recherche :

— Jean-François Hangouët travaille sur l'identification de structures urbaines et plus particulièrement des corrélations entre le bâti et le réseau de rues (thèse démarrée en octobre 1994).

— Nicolas Regnaud travaille sur la généralisation de bâtiments : la sélection et l'agrégation (thèse démarrée en octobre 1994).

— Anne Ruas travaille sur les stratégies de généralisation et des opérations contextuelles telles que le déplacement ou la sélection de rues (thèse démarrée en octobre 1995).

Résultats

En terme d'implémentation, *Stratège* possède les structures permettant de créer, charger, visualiser et manipuler des données géographiques ainsi que des structures et méthodes spécifiques à chacune de nos recherches :

- duplication de la géométrie initiale afin de réaliser un contrôle dynamique des déformations géométriques,
- structure de graphe à recouvrement minimal (Minimum Spanning Tree) pour détecter puis qualifier des groupes de bâtiments sur lesquelles des opérations de sélection et d'agrégation peuvent être appliquées,
- structure de Delaunay pour représenter des relations de voisinage entre objets non connexes,
- création d'une classe Situation permettant de qualifier localement un ensemble d'objets géographiques,
- développement d'un partitionnement de l'espace par les diagrammes de Voronoï.

Ces structures de données permettent de mieux comprendre l'espace géographique et les contraintes à prendre en compte lors de la généralisation.

Les algorithmes suivants ont été développés :

- deux algorithmes d'agrégation et un algorithme d'équarrissage,
- une méthode de sélection de bâtiments basée sur la qualification d'arbres de recouvrement calculés sur les bâtiments,
- des mesures de relations de proximité et d'orientation entre le bâti et le routier pour identifier leur dépendance,
- un mécanisme de déplacement d'objets contrôlé par une triangulation locale de Delaunay.

Parallèlement à ce travail de programmation, un certain nombre de recherches plus théoriques ont été réalisées :

- les principes de généralisation du bâti : sélection, agrégation, déplacement
- la mise au point de grille de mesure afin de qualifier les mesures utilisées pendant le processus de généralisation,
- la mise au point d'un modèle de généralisation intégrant la détection de conflit, le choix de méthode, l'évaluation et le retour en arrière en cas de mauvais choix de généralisation.

Enfin deux études ont été réalisées en collaboration avec d'autres organismes afin de tester des techniques avancées et notamment le multi-agents :

- un stage de fin d'étude de l'Epita sur la sélection du réseau routier : il s'agissait de hiérarchiser le réseau de rues en fonction de sa fréquence d'utilisation en simulant le déplacement de véhicules,
- une collaboration avec le laboratoire LEIBNIZ dans le cadre du PSIG pour la gestion des déplacements d'objets.

Perspectives

En 1997, ces recherches se poursuivront dans l'action de recherche sur la généralisation contextuelle. Notre objectif sera de généraliser une zone urbaine de la BDTOPO par les algorithmes de sélection, d'agrégation et de déplacement développés sous Stratège.

Nous passerons après à l'élaboration d'un modèle de généralisation à base de contraintes et de conflits et à une amélioration des modèles nécessaires à l'identification des structures urbaines.

Références

- [BAEJS, DEMAZEAU] C. Baeijs & Y. Demazeau : *SIGMA rapport final du contrat de recherche 95-0418*.
[HANGOUËT 96a] JF. Hangouët : *Automated generalization fed on latent geographical phenomena*, InterCarto 2, Irkoutsk (Russie), IGN-SR-960008/S-COM, juin 1996.
[HANGOUËT 96b] JF. Hangouët: *City-scape generalization based on structural principles*, IGN, DT, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-960024/S-COM, avril 1996.
[MORISSET 985] B. Morisset : *Simulation pour la hiérarchisation du réseau routier*, rapport de stage EPITA, 1996.
[REGNAULT 96] N. Regnauld : *Recognition of building clusters for generalisation*, SDH'96, vol. 1, pp. 4B1-4B14, Delft (NL), IGN-SR-960044/S-COM, août 1996.

Publication

- [RUAS, PLAZANET 96] A Ruas & C Plazanet : *Strategies for automated generalization* , SDH'96, vol. 1, pp. 6.1-6.18, Delft (NL), IGN-SR-960045/S-COM, août 1996.

C.3.5 Modélisation du linéaire routier

Jean-Georges Affholder

Introduction

Nos travaux en 1996 ont porté, d'une part, dans la continuation de nos travaux antérieurs, d'autre part, dans la recherche d'une voie nouvelle. Cette dernière recherche, juste entreprise en 1996, a été poursuivie en 1997 et semble plus prometteuse. C'est pourquoi, la plus grande partie de nos travaux de « continuation », aujourd'hui dépassés, ne feront pas l'objet de notes détaillées. Cependant, l'approche « ancienne » nous a permis de résoudre un important problème de modélisation du linéaire, sur lequel nous reviendrons.

Continuation des travaux antérieurs

Développement et tests comparatifs de diverses variantes d'algorithmes de représentation par cubiques (l'approche poursuivie jusque là consistait à chercher les points d'inflexion et à approximer entre deux points d'inflexion par deux cubiques, ce qui induisait un effet d'ogive, d'où le développement d'algorithmes de recherche de courbes de raccordement pour faire disparaître cette angularité).

Dans le même ordre d'idée, mentionnons le développement d'algorithmes de boudinage, de caricature, de détection d'autoconflits par déplacement amorti. Toutefois, après discussion avec les chercheurs du laboratoire COGIT, il est apparu que l'on disposait déjà d'assez bons outils dans le domaine du déplacement amorti, ce qui nous a amené à nous tourner vers une approche nouvelle.

À la continuation de nos travaux antérieurs se rattachent d'une part :

— la rédaction d'un document sur la terminologie des opérateurs de généralisation; ce document vise d'une part, à résoudre les problèmes liés à une synonymie et à la polysémie ainsi qu'à imposer un sens plus précis à certains termes fréquemment rencontrés dans la littérature de langue française, d'autre part à proposer des équivalents français aux termes anglo-américains. La publication dans une revue de référence telle que le Bulletin du Comité Français de Cartographie (CFC) était envisagée. Toutefois, il n'a encore fait que l'objet d'une diffusion interne.

D'autre part :

— la généralisation à une polygonale de la notion de courbure en un point donné, problème que nous rattacherons au problème de la recherche des points caractéristiques d'une polygonale, et en particulier à la recherche des maxima de courbure. Mais une version véritablement opérationnelle - et donc le document descriptif de la méthode - n'a vu le jour qu'en 1997.

Vers une approche nouvelle

En simplifiant, il s'agit d'utiliser les ressources de l'informatique pour tenter de dégager par voie automatique les règles de généralisation du linéaire routier. Cette approche est décrite dans une note interne [AFFHOLDER 96].

Publications

[AFFHOLDER 96] JG. Affholder : *Généralisation du linéaire : une approche nouvelle*, note interne, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 1996.

C.3.6 Problèmes liés à la généralisation de l'orographie

Pascale Monier

Contexte

La généralisation de l'orographie est un processus qui vise à simplifier les formes du terrain tout en gardant ses caractéristiques principales. Les essais réalisés en utilisant les courbes de niveau comme représentation principale fournissent des résultats de qualité médiocre. De même, l'utilisation d'un filtre global appliqué au MNT (Modèle Numérique de Terrain) n'est pas satisfaisante : les crêtes deviennent trop molles, les vallées perdent leurs accidents, et il arrive que les thalwegs ou les cols soient fortement déplacés.

Par contre, une application locale de traitements associée à un contrôle visuel donne de bien meilleurs résultats. C'est aussi la conclusion de Robert Weibel de l'université de Zurich qui propose un modèle de généralisation adaptative où le traitement dépendrait du type de relief identifié. Une thèse a donc démarré en 1993 au laboratoire COGIT visant à caractériser le relief en vue de sa généralisation.

Résultats

Le principe de généralisation proposé repose sur une caractérisation du relief, afin d'appliquer localement les opérations qui maintiennent le caractère de chaque zone, tout en les simplifiant. Les éléments caractéristiques du relief sont décomposés en deux familles :

- une description des caractères du terrain (altitude, pente, dureté, etc...) et,
- une description des structures du relief, à savoir les crêtes et les thalwegs. Ces deux représentations (espace maillé qualifié et lignes de structures) permettent de définir des espaces de travail et d'appliquer des opérations particulières.

La première tâche a consisté à segmenter l'espace en " zones homogènes ". La méthode utilisée repose sur la détection de points caractéristiques et de la construction d'un diagramme de Voronoï autour de ces points.

Les points retenus sont les extrémités de crêtes et de thalwegs qui possèdent un facteur d'entrelacement et d'encaissement important. Lorsque le diagramme de Voronoï est calculé, on qualifie chaque cellule en fonction des altitudes, des pentes et de la dureté. On isole ensuite automatiquement les zones de plaines des autres zones et on fusionne les cellules connexes lorsqu'elles partagent les mêmes caractéristiques.

Après le mécanisme de fusion, on arrive à distinguer quatre catégories de zones :

- les montagnes,
- les collines,
- les plaines,
- les zones de transition.

Chaque cellule fusionnée est par la suite qualifiable par un ensemble de paramètres orographiques.

Perspectives

Parmi les techniques de généralisation, il apparaît que le filtrage de MNT et le traitement des structures sont deux techniques importantes et complémentaires.

Sur le MNT, on peut envisager deux techniques de généralisation distinctes : la généralisation des cellules définies précédemment avec des filtres adaptés (qui impose le développement de techniques pour la gestion correcte des frontières) ou le calcul des paramètres de filtrage de façon locale pour un traitement global du MNT. Cette deuxième approche est certainement la plus robuste mais plus délicate à mettre en œuvre.

Le traitement des lignes de structures repose sur une hiérarchisation de ces lignes, afin de distinguer les lignes que l'on peut éliminer de celles qu'il faudra conserver, voire amplifier. L'élimination d'une ligne de structure provoque un lissage du MNT dans son environnement proche.

Un stage doit avoir lieu au laboratoire COGIT courant 1997, afin de hiérarchiser selon différents critères le réseau de thalwegs issu du MNT et une thèse devrait démarrer courant 1997 pour étudier les techniques de généralisation du relief en s'appuyant sur les résultats déjà obtenus en matière de segmentation et qualification du relief.

Publications

[MONIER 96] P. Monier : *Automated generalization of relief in the GIS environment*, in Proceedings of the 1st international conference on GIS in urban regional and environmental planning pp 167-177, Samos (Grèce), April 19-21, IGN-SR-960006/S-COM, 1996.

[MONIER et al 96] P. Monier, E. Beauvillain & O. Jamet : *Extraction d'éléments caractéristiques pour une généralisation automatique du relief*, in Revue Internationale de Géomatique 6 (2-3), 191-201, IGN-SR-960040/S-ART, 1996.

[MONIER 97] P. Monier : *Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique. Application à la généralisation de l'orographie*, thèse de Doctorat Université Louis Pasteur, IGN-SR-970001/S-THE, juillet 1997.

C.3.7 Maquette de généralisation

François Lecordix

Introduction, contexte et objectif de l'étude

Destinée à fournir un prototype de plate-forme de généralisation assistée par ordinateur, cette action doit permettre de valider les recherches mises en œuvre au laboratoire COGIT. Elle vise à utiliser les outils automatiques développés et à définir le processus de généralisation assistée par ordinateur.

Résultats

Les travaux ont concerné principalement les données routières.

Afin de pallier aux manques en algorithmes de caricature permettant de traiter les séries de virages empâtés ou mollement sinueux, un premier effort a porté sur l'intégration PlaGe des algorithmes développés au laboratoire COGIT pour résoudre ces problèmes : algorithme adapté de Lowe pour les virages mollement sinueux, algorithme de l'accordéon et de la baudruche pour écarter une série de virages en lacets, algorithme Plâtre de lissage caricature par utilisation des courbures, algorithme de schématisation pour éliminer deux virages successifs dans une série de virages en lacets.

Une autre partie des recherches a concerné le déplacement des éléments linéaires pour résoudre les conflits de proximité et superposition. Jusqu'alors, dans la plate-forme de généralisation PlaGe développée au laboratoire COGIT, il n'existait qu'un module interactif très élémentaire (déplacement d'un point d'un arc).

Pour réaliser un prototype de plate-forme de généralisation, il était nécessaire d'améliorer ce module en proposant différents modes d'amortissement du déplacement le long de l'arc et la propagation au-delà des nœuds.

Cette propagation avec amortissement a été aussi utilisée pour le cas de l'algorithme de l'accordéon afin d'assurer les raccords entre la partie la plus sinueuse de la route qui est décalée et les parties les plus rectilignes.

En complément de ces outils, quelques modules intermédiaires ont été ajoutés dans PlaGe : décomposition de la ligne en segments de longueurs égales, découpage d'un arc en deux, chaînage d'arcs, calcul et dessin des bords des routes en tenant compte de l'emprise du signe cartographique....

Dans le cadre de la définition du processus de généralisation, des modules ont été créés pour détecter automatiquement les zones à problème et afficher au centre de la console le problème.

Cette détection s'effectue en mode vecteur et s'appuie sur le calcul des bords des routes en prenant en compte l'emprise du signe cartographique. Ce module de détection est opérationnel pour les auto conflits (zones d'empâtement des virages) et est fortement avancé pour les conflits inter-éléments (superposition entre deux arcs).

De plus, dans ce dernier cas, le logiciel propose une solution (déplacement) pour résoudre le conflit. Cette approche pour les conflits inter-éléments, issue des travaux de [NICKERSON 88], devra être poursuivie en 1997, notamment pour trouver une meilleure solution au problème de propagation qui dépend actuellement de l'abscisse curviligne sans prendre en compte l'orientation de la ligne à déplacer par rapport à l'orientation du vecteur de déplacement initial.

Perspectives

Progressivement, les validations visuelles effectuées actuellement par le cartographe guidant le processus de généralisation devront être remplacées par l'utilisation de mesures. Celles-ci doivent permettre de déterminer la valeur des paramètres à introduire et valider les opérations effectuées.

Référence

[NICKERSON 88] B. Nickerson : *Automated cartographic generalization for linear features*, in *Cartographica*, vol. 25, n° 3, pp. 15-66, 1988.

Publication

[LECORDIX et al 97] F. Lecordix, C. Plazenet & JPh. Lagrange : *PlaGe : a Platform for research in Generalization. Application to caricature*, in *Geoinformatica* en 1997, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR-970022/S-ART, 1997.

C.4.1 Amélioration de l'ITRF

Patrick Sillard

Introduction, contexte et objectif de l'étude

L'IGN, par l'intermédiaire du LAREG, est impliqué depuis de nombreuses années dans les activités du Service International de Rotation de la Terre (IERS), en particulier dans celles concernant la réalisation du Système International de Référence Terrestre (ITRS).

Après le calcul de la réalisation 1994 (ITRF94) de ce système, il est apparu nécessaire d'effectuer une pause dans le rythme d'élaboration annuel de références terrestres, dans le souci d'une meilleure appréhension des problèmes rencontrés.

Des domaines de recherche nouveaux s'imposent peu à peu, aux yeux de la communauté internationale, comme essentiels, en particulier à la lumière d'expériences pilotes menées en concertation par diverses équipes dans le monde sous l'égide d'associations internationales (International GPS Service (IGS), ITRF datum working group, Commission X de l'Association Internationale de Géodésie).

Parmi ces domaines, les études liées aux séries temporelles de références terrestres (réalisations mensuelles, hebdomadaires) sont clairement à développer pour la grande latitude de traitement qu'elles permettent.

Les réflexions se situent à deux niveaux : d'une part, la modélisation physique caractérisant l'évolution temporelle des références terrestres, et d'autre part, le modèle stochastique à associer à la modélisation physique.

Les sous-produits de telles recherches sont très variés et susceptibles d'intéresser plusieurs communautés : mécanique spatiale, les paramètres d'orientation de la Terre étant particulièrement sensibles aux erreurs du modèle dynamique utilisé lors de la restitution de l'orbite des satellites artificiels de la Terre; géophysique, en ce qui concerne la connaissance du mouvement du centre des masses de la Terre et de l'évolution temporelle de l'échelle du système de référence, ainsi que l'étude des déformations de la croûte terrestre; astronomique, en ce qui concerne la détermination des paramètres de rotation de la Terre; marégraphique, altimétrique, etc

Enfin, toujours dans un souci de compréhension approfondie des problèmes, il est opportun d'envisager dès à présent, une modélisation relativiste exhaustive des systèmes de référence terrestres compte tenu des précisions atteintes par les mesures de Géodésie spatiale (10^{-9}).

Travaux réalisés en 1996

Au cours de l'année 1996, l'accent a été mis sur la modélisation statistique des combinaisons de jeux de coordonnées.

Pour cela, des travaux théoriques ont été menés, d'une part sur la structure intrinsèque de la variance des jeux de coordonnées de Géodésie Spatiale, et d'autre part sur la détermination des pondérations relatives à utiliser lors de combinaisons de populations statistiquement hétérogènes.

Puis, ces nouvelles approches ont été informatiquement implémentées pour être validées, le logiciel ainsi développé devant, à terme, remplacer l'ancien outil SSCMIX qui ne combinait que des jeux de coordonnées, le nouveau logiciel combinant, quant à lui, coordonnées et vitesses de stations simultanément. Le processus de validation est en cours. Par ailleurs, des analyses préliminaires de séries temporelles ont montré tout le bénéfice que l'on peut tirer de cette approche.

Enfin, une approche relativiste du géoïde a été développée dans l'esprit d'une appréhension systématique des références terrestres dans ce contexte théorique.

Objectifs pour 1997

Les objectifs scientifiques de cette recherche sont multiples :

— d'une part, implémenter, au sein d'un développement informatique nouveau, les méthodes statistiques d'analyse de variance étudiées par P. Sillard durant l'année 1996 et qui ont déjà fait la preuve de leur efficacité pour les combinaisons de jeux de coordonnées. Ce développement devra tenir compte de la spécificité des séries temporelles à traiter, et devra, en premier lieu, être évolutif, en particulier en ce qui concerne le paramétrage stochastique et physique de l'estimation,

— sur la base de ce développement et des outils déjà existants, le laboratoire LAREG s'attachera à consolider sa position privilégiée dans le domaine des systèmes de référence, en particulier en améliorant la connaissance et la

maîtrise des séries temporelles de références terrestres par le biais des traitements et analyses de données appropriées. Cette action se placera dans le cadre de l'IERS,

— établir une formulation cohérente des systèmes de référence terrestres dans le cadre de la Relativité Générale en collaboration avec des centres d'analyses de Géodésie Spatiale de l'IERS dont l'intérêt pour le sujet est convergent avec celui exposé plus haut.

La démarche prévue pour 1997 est la suivante : en premier lieu, effectuer les développements informatiques évoqués plus haut, dans un souci permanent de qualité; par ailleurs, être capable de prendre part aux expériences pilotes qui vont être lancées sous peu, sous l'égide de l'IERS, dans le but d'évaluer la faisabilité et l'opportunité d'une détermination systématique de la position du centre des masses de la Terre et de l'échelle du système de référence terrestre.

Les deux actions sont liées, à terme, mais à échéance courte, elles sont indépendantes, les outils informatiques actuellement disponibles au laboratoire LAREG permettant, d'ores et déjà, de répondre à une partie du problème soulevé par les expériences pilotes.

Il est cependant crucial de faire évoluer rapidement les méthodes de traitements, sous peine de perdre toute influence significative dans ce domaine.

Le premier point clé sera la réponse à la proposition de participation à l'expérience pilote de l'IERS pour la détermination du mouvement du centre des masses de la Terre et de l'échelle du système de référence (janvier 1997). Le deuxième point clé sera l'aboutissement des développements informatiques (automne 1997) envisagés.

Publications

[ALTAMIMI, SILLARD] Z. Altamimi & P. Sillard : *Le Système International de Référence Terrestre*, à paraître dans la Revue Internationale de Géomatique, 1996.

[SILLARD 96] P. Sillard : *Analyse statistique des combinaisons de jeux de coordonnées, proposition de scénario de traitement*, publications du LAREG MM013, 1996.

[SILLARD 96] P. Sillard : *The use of orthogonal projectors for sets of coordinates combinations ITRF'96 workshop*, publications du LAREG CM033, 1996.

[SILLARD 96] P. Sillard : *Quelques éléments en vue d'une approche relativiste du géoïde*, in Actes du congrès Systèmes de références spatio-temporels, 1996.

[SILLARD, BOUCHER 96] P. Sillard & C. Boucher : *Improvement of the transformation between ITRF and Doppler-Realized WGS84*, in Journal of Geodesy, vol. 70, n°. 11, 1996.

[SILLARD, BOUCHER 97] P. Sillard & C. Boucher : *Algebraic minimum constraints for reference frames datum definition*, soumis au Journal of Geodesy, 1997.

C.4.2 Géoïde

Pascal Willis

Introduction, contexte et objectif de l'étude

Le géoïde est une surface équipotentielle du champ de gravité proche du niveau moyen des océans. Depuis l'arrivée des techniques spatiales de positionnement et en particulier le GPS, la connaissance du géoïde devient de plus en plus importante pour les utilisateurs. En effet, ceux-ci, grâce au GPS, n'ont accès naturellement qu'à des altitudes ellipsoïdales (purement géométriques et donc insensibles à la pesanteur) alors que pour la plupart des travaux la notion d'altitude reste liée à la notion de travail au sens de la physique (l'eau coule des altitudes positives vers les altitudes négatives).

En fait, d'un point de vue légal, les utilisateurs sont aussi intéressés par la surface zéro des altitudes du nivellement (IGN69 en France métropolitaine). Cette surface est peut-être considérée comme une réalisation approchée du géoïde.

Le but de cette action de recherche est de déterminer des réalisations numériques de plus en plus précises de ces deux surfaces (géoïde et surface zéro du nivellement IGN69).

Résultats obtenus en 1996

Dans le cadre de la thèse de Z. Jiang, un nouveau logiciel (PILI) a été développé permettant d'accélérer significativement les calculs d'intégration.

Plusieurs essais ont été menés en parallèle par J. Jiang et H. Duquenne (maintenant détaché à l'ESGT) à partir de méthodes un peu différentes. Il s'agit d'utiliser aux mieux toutes les données disponibles pour tenter d'évaluer aux mieux ces deux surfaces (données gravimétriques en France fournies par le BGI, altitudes GPS de points nivelés...).

Il faut noter que la France dispose actuellement d'un réseau dense de points GPS nivelés qui permet d'essayer plusieurs méthodes d'assimilation de données hétérogènes ainsi que plusieurs scénarios d'interpolation. Les résultats obtenus actuellement sont de l'ordre de quelques centimètres (deux centimètres localement dans des régions non montagneuses).

Afin de tester au mieux les résultats obtenus, ainsi que d'autres modèles de surfaces obtenus à l'étranger (modèles mondiaux, européens), un sous-groupe a été créé dans le cadre du groupe de travail permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique" sous la direction de P. Willis. Ce groupe est chargé d'inventorier les différents modèles de corrections altimétriques existants (pour passer directement des altitudes GPS à une altitude proche de l'IGN69) et de les comparer en terme de qualité et de facilité d'emploi pour les futurs utilisateurs.

Publications

[JIANG Z. 96a] Z. Jiang : *Geoid prediction using GPS levelling points and digital terrain model - a new French geoid determination*, in Proceedings XXlth EGS Meeting, pp. 121-128, 1996.

[JIANG Z. 96b] Z. Jiang : *Méthodologie moderne de la détermination du géoïde et application à la réalisation d'une référence verticale opérationnelle : contribution au géoïde français*, thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, décembre 1996.

[JIANG Z. et al 96a] Z. Jiang, G. Balmino, H. Duquenne : *On the numerical approximation of the errors in a GPS aided gravimetric geoid determination*, in Proceedings XXlth EGS Meeting, pp. 57-65, 1996.

[JIANG Z. et al 96b] Z. Jiang, H. Duquenne : *On the combined adjustment of a geometrically determined geoid and GPS levelling stations*, in Journal of Geodesy, 70, 505-514, 1996.

[JIANG Z. et al 96c] Z. Jiang, H. Duquenne : *On fast integration in geoid determination*, in Journal of Geodesy, 71, 2, 59-69, 1996.

C.4.3 Positionnement DORIS

Pascal Willis

Introduction, contexte et objectif de l'étude

Le système DORIS est un système français d'orbitographie de satellites bas conçu et réalisé par le CNES en collaboration avec l'IGN et le GRGS. Ce système a été embarqué sur trois satellites (SPOT-2, SPOT-3 et TOPEX/POSEIDON) et permet aussi des applications au positionnement précis ainsi que la détermination de la rotation terrestre.

Depuis 1996, DORIS a été acceptée comme technique de l'IERS (Service Internationale de la Rotation Terrestre) au même titre que le VLBI, la télémétrie laser et le système GPS. Dans ce cadre, l'IGN a été sélectionné par l'IERS pour assurer les fonctions de centre de coordination international, de centre de données et de centre d'analyse.

Cette action de recherche reprend donc les activités de service scientifique liées à l'IERS ainsi que toutes les recherches fondamentales permettant d'assurer la pérennité de ce service.

Positionnement DORIS

En 1996, toutes les données DORIS disponibles pour l'IERS ont été retraitées à l'IGN en mode multisatellites. Ces calculs journaliers ont permis d'obtenir des solutions journalières, puis mensuelles et enfin une solution globale combinée permettant d'estimer pour chaque station des vitesses de déplacement horizontales et verticales.

Une étude théorique a été menée pour évaluer l'effet du système de référence terrestre sur la détermination des solutions mensuelles. Il s'agit de déterminer la qualité des transformations journalières ou mensuelles permettant d'exprimer les résultats DORIS de positionnement dans un même système de référence géodésique maintenu de manière fiable dans le temps.

Une première étude a aussi été menée sur l'intérêt de ces solutions mensuelles de jeux de coordonnées DORIS pour évaluer d'éventuelles variations du géocentres. Un accord au niveau de quelques cm a été obtenu avec des résultats obtenus par d'autres groupes (JPL, USA) avec le système GPS. Ces résultats ont été jugés suffisamment intéressants par l'IERS pour programmer une campagne internationale de mesure et d'interprétation des variations du géocentre en 1997.

Rotation terrestre

En 1996, une étude nouvelle a été menée par un stagiaire du DEA (L. Morel) pour essayer d'estimer les erreurs systématiques dues au choix du jeu de coordonnées des stations de poursuite DORIS sur la détermination des paramètres de la rotation terrestre (en particulier, le pôle de la rotation terrestre). Cette étude a permis de mettre ces effets en évidence et de vérifier que la nouvelle solution ITRF-94 est bien meilleure que toutes les réalisations antérieures.

de type JCOD. Il reste toutefois encore des erreurs résiduelles qui justifie pour l'IERS le choix de recalculer une nouvelle réalisation du système de référence terrestre (ITRF-C1).

Coordination DORIS pour l'IERS et centre de données

Un serveur Web a été constitué en collaboration avec les autres organismes participant à l'IERS. Un système de messagerie automatique a été mis en place (dorismail). Le centre de données permet un accès en ligne de plus de deux ans de données (environ deux cents Mo) et est régulièrement utilisé par vingt-quatre organismes différents répartis dans quinze pays différents.

Références

[MOREL 96] L. Morel : *Etude de l'influence des jeux de référence sur les résultats DORIS (pôle de la rotation terrestre, orbitographie, positionnement, rapport de stage, DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS002, juin 1996.*

[SILLARD 96] P. Sillard : *Some preliminary results on monthly solutions, ITRF Workshop, Saint-Mandé, IGN/LAREG CM003, 1996.*

[SIMB 96] SIMB : *Service d'Installation et de Maintenance des Balises DORIS, Etat du réseau orbitographique DORIS au 1/1/96, CNES CT/ED/TU/TD n° 96.108, janvier 1996.*

Publications

[WILLIS 96a] P. Willis : *Le système DORIS : présentation, rôle et recherches menées à l'IGN, in Revue Internationale de Géomatique, 6,2-3, 289-304, 1996.*

[WILLIS 96b] P. Willis : *Définition d'un protocole de tests visant à définir une procédure optimale pour obtenir des coordonnées DORIS mensuelles dans un système de référence mondial maintenu de manière fiable dans le temps, IGN/LAREG SP003, 1996.*

[WILLIS 96c] P. Willis : *Géodésie Spatiale par méthode dynamique : Applications au positionnement DORIS : 1ère partie, IGN/LAREG CM024, 1996.*

[WILLIS 96d] P. Willis : *Géodésie Spatiale par méthode dynamique : Applications au positionnement DORIS : 2ème partie, IGN/LAREG CM025, 1996.*

[WILLIS 96e] P. Willis : *Notice utilisateur du logiciel GIPSY/OASIS pour les calculs DORIS à l'IGN, rapport interne, version 0.2, décembre 1996.*

[WILLIS et al 96] P. Willis, Z. Altamimi : *Site velocities estimation using the DORIS system in a multisatellite mode, AGU spring meeting, Baltimore (USA), IGN/LAREG CM027, 1996.*

C.4.4 Étude des déformations tectoniques par méthodes géodésiques

Thierry Duquesnoy

Contexte

La mesure directe des mouvements des plaques lithosphériques est un des thèmes de recherche en plein développement depuis l'apparition des techniques spatiales. En effet, celles-ci donnent la possibilité de travailler avec une grande précision à des échelles différentes. En particulier, la possibilité de mesurer des réseaux à grandes échelles (plusieurs centaines de kilomètres) permet de contraindre les modèles de tectonique globale.

Objectifs

- Détermination des mouvements instantanés (à l'échelle des temps géologiques) et absolus des plaques lithosphériques par l'utilisation des méthodes de géodésie spatiale.
- Comparaison de ces mouvements avec les mouvements relatifs à long terme des modèles de tectonique globale issus des mesures sur les failles transformantes, les mécanismes au foyer et les anomalies magnétiques.
- Détermination de la réponse lithosphérique à la dynamique terrestre
- Détermination des vitesses de déformation à l'échelle régionale aux frontières de plaques et dans les zones intraplaques
- Surveillance et dynamique des volcans.

Activités - Résultats

L'année 1996 a été consacrée plus particulièrement à la publication des résultats obtenus après la réitération des différents réseaux installés autour des failles de Sumatra et des Philippines.

La première partie de l'année a été consacrée à la rédaction d'un article dans une revue internationale à comité de lecture (Geophysical Research Letters) sur les résultats du réseau de Liwa au sud de l'île de Sumatra. Un séisme de magnitude $M_w = 6,8$ a rompu le segment de la faille de Sumatra, voisin du réseau de Liwa-ranau. Cet article présente les déplacements cosismiques enregistrés par des méthodes géodésiques et présentent une modélisation simple de la rupture.

La suite de l'année a été consacrée à la rédaction du mémoire de la thèse intitulée : "Apport de la géodésie dans l'étude des décrochements actifs à l'arrière des zones de subduction à convergence oblique. Exemple de la grande faille de Sumatra et de la faille Philippine". Après une brève présentation des techniques géodésiques disponibles, une présentation cinématique du Sud-Est asiatique est faite. Les résultats des deux réseaux géodésiques implantés au sud et au centre de Sumatra sont exposés. Les résultats concernant les trois réseaux géodésiques installés dans la partie centrale de la faille Philippine sont ensuite présentés. Ce travail est conclu par une comparaison du fonctionnement des segments étudiés des deux failles et l'implication des résultats sur la cinématique de la région.

Publications

[DIAMENT et al 95] M. Diament, Ph. Jousset, F. Beauducel, S. Dwipa & Th. Duquesnoy : *Microgravity and elevations variations monitoring on Merapi Volcano (Indonesia)*, International Union of Geodesy and Geophysics, XXI General Assembly, Boulder USA, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOEMI, SR-950010/L-COM, 1995.

[DUQUESNOY et al 94] Th. Duquesnoy, E. Barrier, M. Kasser, M. Aurelio, R. Gaulon, RS. Punongbayan, C. Rangin and the french-Philippine Cooperation Team : *Detection of creep along the Philippine fault : first results of geodetic measurements on Leyte island, central Philippine*, in Geophysical Research Letters, vol. 21, pp. 975-978, June 1, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOEMI, SR-940005/L-ART, 1994.

[DUQUESNOY et al 95a] Th. Duquesnoy, E. Barrier & M. Kasser : *Geodetic Survey of the Philippine Fault*, in Terra abstracts,7, EUG, Strasbourg (F), IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOEMI, SR-950003/L-ART, 1995.

[DUQUESNOY et al 95b] Th. Duquesnoy, O. Bellier, Ch. Vigny, M. Kasser & M. Sébrier : *Déformation co-sismique du séisme de Liwa du 15 février 1994 et évaluation du risque sismique du sud de Sumatra (Indonésie) : apport des mesures géodésiques*, rapport DRM, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOEMI, SR-950009/L-RAP, janvier 1995.

[DUQUESNOY et al 96] Th. Duquesnoy, O. Bellier, M. Kasser, M. Sébrier, Ch. Vigny & I. Bahar : *Deformation related to the 1994 Liwa earthquake derived from Geodetic Measurements*, in Geophys. Res. Let., IGN, Service de la recherche, laboratoire LOEMI, SR-960002/L-ART, 1996.

[JOUSSET et al 96] P. Jousset, S. Dwipa, F. Beauducel, T. Duquesnoy & M. Diament : *Temporal gravity at Merapi during the 1993-1995 crisis : an insight into the dynamical behavior of volcanoes*, soumis au Journal of Volcanological and geothermal Research, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOEMI, SR-960015/L-ART, 1996.

[RUEGG et al 96] JC. Ruegg, J. Campos, R. Armijo, S. Barrientos, P. Briole, R. Thiele, M. Arancibia, J. Canuta, T. Duquesnoy, M. Chang, D. Lazo, H. Lyon-Caen, L. Ortlieb, JC. Rossignol & L. Serrurier : *The $M_w = 8,1$ Antofagasta (North Chili) earthquake of July 30, 1995 : first results from teleseismic and geodetic data*, in Geophys. Res. Let., 23, 9, 917-920, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOEMI, SR-960012/L-ART, 1996.

C.4.5 GPS cinématique

Pascal Willis

Introduction

Le GPS est devenu une technique incontournable pour les applications de navigation et de positionnement. Beaucoup plus récemment, les applications cinématiques du GPS ont permis d'obtenir de conserver la souplesse des applications navigation (localisation d'un mobile) et la précision centimétrique des applications topométriques et géodésiques.

Toutefois, ces méthodes cinématiques nécessitent des algorithmes particuliers de détermination et de fixation d'ambiguïtés entières (nombre inconnu de longueurs d'onde entre le récepteur au sol et le satellite).

L'étude mathématique de ces nouveaux algorithmes est l'objet de cette recherche particulière à l'IGN. Pour cela on se propose tout d'abord de faire un panorama des différentes techniques actuelles développées dans le monde avant de faire de nouvelles propositions et finalement de les valider en vraie grandeur.

De telles méthodes cinématiques ont des retombées industrielles importantes dans des domaines très variées: agriculture (tracé de sillon, analyse des sols et des récoltes en liaison avec un SIG), travaux publics (chaussées) et topométrie (cadastre, levés rapides pour les géomètres).

Bilan des actions menées en 1996

L'action de recherche proposée en 1996 reposait essentiellement sur l'encadrement d'un stagiaire.

Des propositions de stages ont été envoyés dans plusieurs DEA et écoles d'ingénieurs sans succès. L'action n'a donc pas avancé au rythme prévu par faute de moyens en personnel.

Cette proposition de stage sera rediffusée en 1997 plus largement.

Toutefois, l'activité n'a pas été entièrement nulle en 1997, puisque P. Willis a été accepté comme membre du groupe de travail de l'AIG SSG 1.157 (GPS ambiguity resolution and validation) dirigé par P.J. de Jonge (Pays-Bas) sur un sujet très proche. Une partie de l'effort de compilation des algorithmes déjà existants a donc pu être commencé.

C.4.6 Traitement de données GPS en Antarctique : mouvements du sol et technique de calcul

Marie-Noëlle Bouin

GPS en Antarctique : objectifs et intérêts

Le "rebond postglaciaire" en Antarctique

Le continent Antarctique est l'une des régions du monde où les techniques de géodésie spatiale sont les plus prometteuses pour la compréhension d'une grande variété de phénomènes géophysiques.

Nous nous intéressons aux mouvements de déformation de la croûte terrestre à grande longueur d'onde, provoqués par des variations de masse de glace sur le continent Antarctique.

Une charge posée à la surface de la Terre provoque une modification du champ de gravité terrestre et une déformation de la surface

Les effets produits correspondent à deux forces différentes s'opposant à l'enfoncement, provenant d'une part, de la rigidité élastique de la lithosphère, d'autre part de la force d'Archimède de la partie supérieure du manteau terrestre.

Les vitesses verticales de la croûte en surface dépendent fortement du modèle de simulation isostatique retenu : lithosphère dont on néglige ou non la rigidité, réponse de l'asthénosphère selon un processus relaxé ou diffusif.

E. Le Meur (laboratoire de Glaciologie de l'Université de Grenoble) a développé un modèle de réponse isostatique de Terre globale, avec une lithosphère élastique et une asthénosphère viscoélastique.

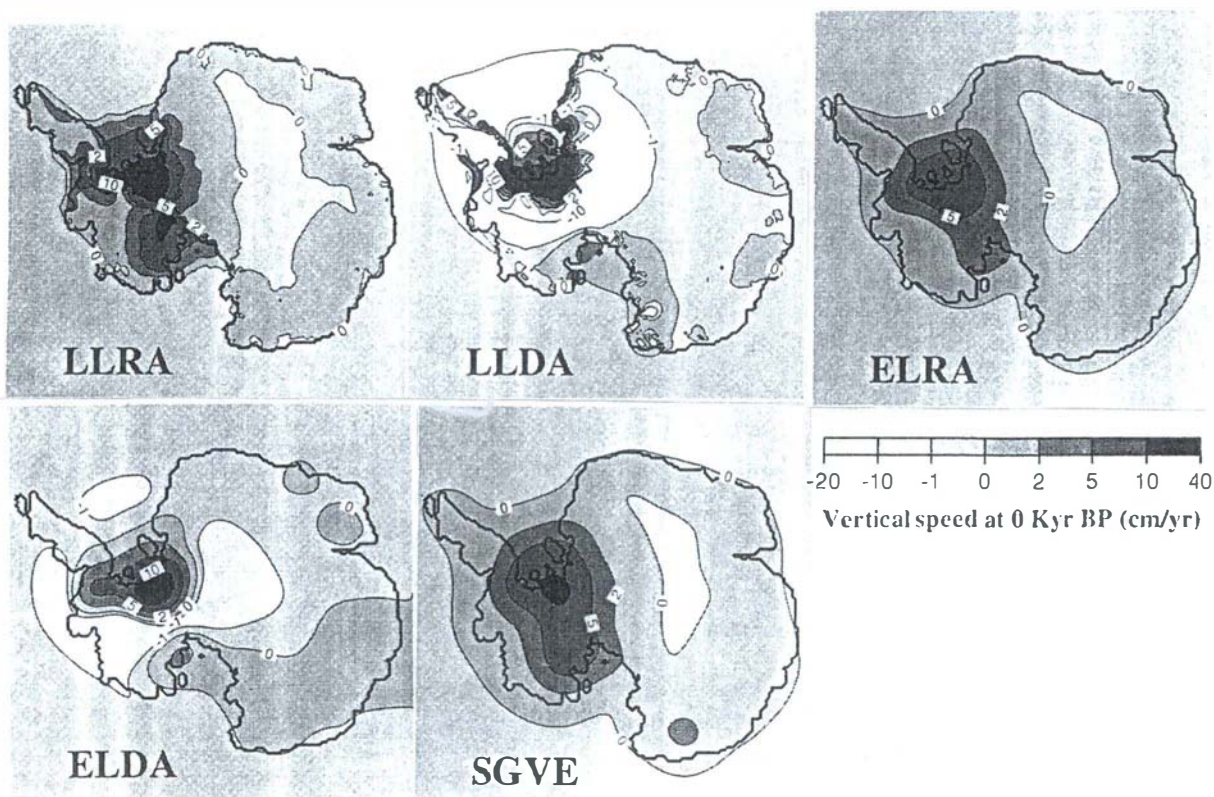


figure C.4.6.1

vitesses verticales obtenues par différents modèles : lithosphère non-rigide (locale), asthénosphère relaxée LLRA; lithosphère locale, asthénosphère diffusive LLDA; lithosphère élastique, asthénosphère relaxée ELRA, lithosphère élastique, asthénosphère diffusive ELDA, modèle isostatique viscoélastique de Terre globale SGVE.

Choix des données traitées

Les données traitées proviennent de stations GPS permanentes du réseau IGS en Antarctique. Trois de ces stations fournissent des enregistrements depuis juin 1994 (Casey, Davis et McMurdo), une quatrième fonctionne à O'Higgins depuis juin 1995 :

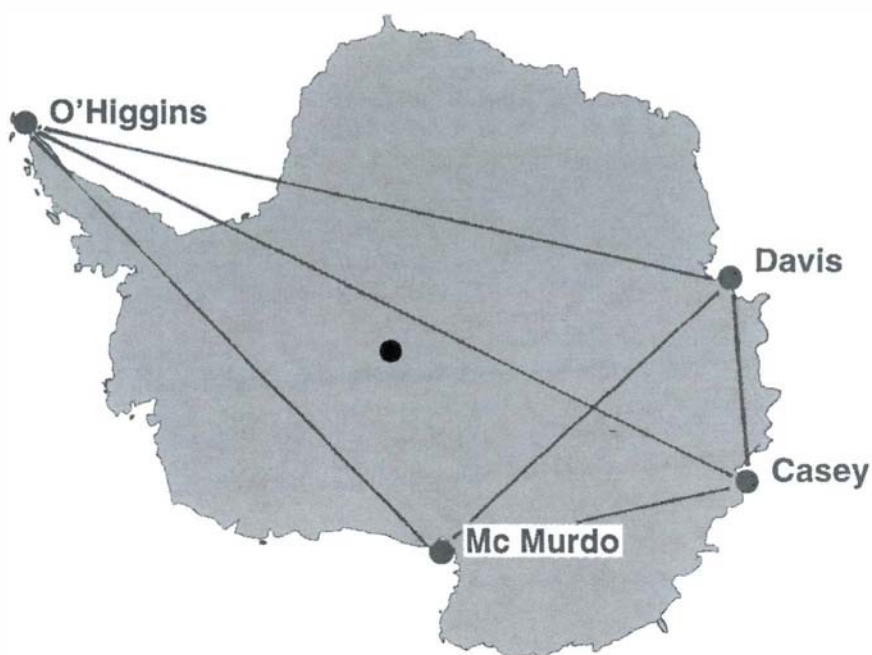


figure C.4.6.2 : carte du réseau des stations permanentes IGS en Antarctique

Traitement des données - Technique de calcul

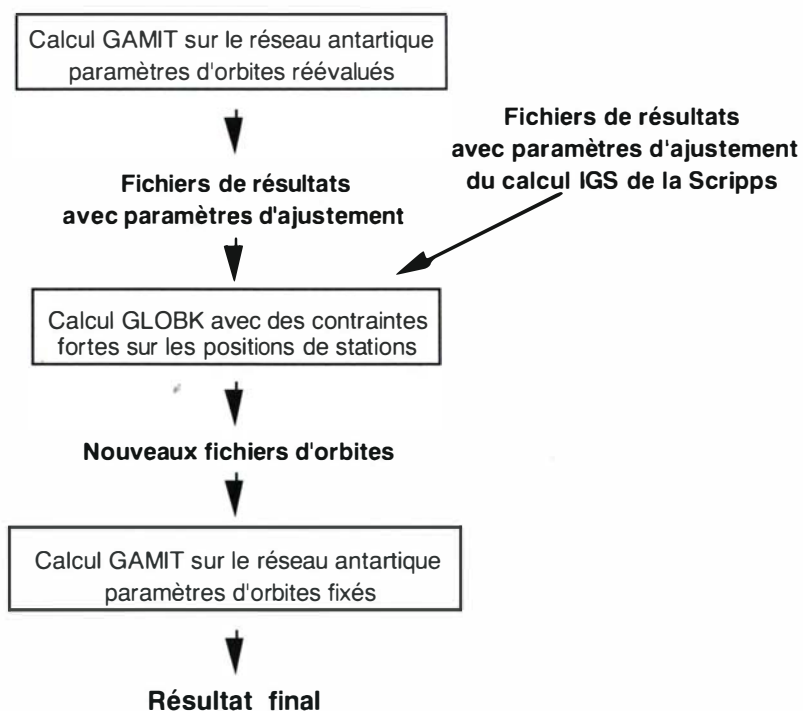


figure C.4.6.3 : schéma du processus de calcul

Spécificités du GPS en Antarctique

Ionosphère

Du fait de la géométrie des lignes de champ du champ magnétique terrestre, l'activité ionosphérique est particulièrement importante au-dessus des calottes polaires, donc de l'Antarctique.

Le premier ordre de la perturbation des signaux peut en être soustrait en utilisant pour le calcul une combinaison linéaire appropriée des signaux des fréquences L1 et L2 enregistrées par les récepteurs.

Le premier ordre de la perturbation des signaux peut en être soustrait en utilisant pour le calcul une combinaison linéaire appropriée des signaux des fréquences L1 et L2 enregistrées par les récepteurs.

Les perturbations ionosphériques sont parfois si importantes qu'enlever le premier ordre ne suffit pas toujours à obtenir un signal exploitable.

De plus, des sauts de cycles d'origine ionosphérique peuvent dépasser le maximum prévu pour le récepteur et empêcher l'enregistrement.

Résultats

Nous présentons les résultats obtenus selon les deux techniques de calcul (orbites IGS fixes ou orbites réajustées à l'aide du filtre de Kalman).

Séries temporelles

Des séries temporelles des différentes composantes des lignes de base ont été obtenues sur des périodes de plusieurs centaines de jours.

Géométrie et précision des orbites

Contrairement à ce que l'on observe en un point de la surface de la Terre de latitude moyenne, les satellites décrivent au dessus de l'Antarctique des arcs de cercle couvrant une large part de l'horizon. Leur élévation moyenne est par contre relativement basse.

La majeure partie de l'erreur sur la position d'un satellite porte sur la composante parallèle à la trace du satellite, donc ici essentiellement sur la composante Est. Par contre, l'erreur sur la composante verticale devrait se trouver réduite par la bonne couverture azimutale des satellites.

Par ailleurs, une petite étude de comparaison de la dispersion des solutions de calcul d'orbites proposées par les différents centres pour la combinaison IGS permet de montrer que la précision des orbites se dégrade vers les basses latitudes.

Cela s'explique par la disparité dans la géographie du réseau des stations IGS permanentes utilisées pour le calcul, au profit de l'hémisphère Nord.

Géographie

Le réseau traité a la particularité d'être très peu dense (trois à six lignes de base) donc très peu contraint, et constitué de lignes de base très longues (de 1400 à plus de 6000 km).

L'intervisibilité satellite-station s'en trouve réduite, ce qui explique que le nombre de doubles différences est souvent bien inférieur au nombre de données enregistrées par une station.

Techniques de calcul

Le logiciel de calcul utilisé est celui du MIT (GAMIT). Il permet de travailler en double différence (réduction des erreurs d'horloge des stations et des satellites) et d'utiliser toutes les lignes de base du réseau.

Le calcul peut être fait à partir des orbites laissées fixes, ou bien en réévaluant les paramètres d'orbites dans le calcul.

Nous avons traité des sessions de vingt-quatre heures (solutions journalières), avec des contraintes lâches sur toutes les stations, en utilisant les orbites IGS laissées fixes dans un premier temps.

Une tentative pour fixer les ambiguïtés n'a pas abouti, très probablement à cause de la longueur excessive des lignes de base du réseau.

La précision relativement mauvaise des orbites IGS aux basses latitudes de l'hémisphère Sud nous a poussés à essayer de réévaluer les paramètres orbitaux au cours du calcul.

Comme les quatre stations antarctiques ne peuvent à elles seules apporter une information suffisante, nous avons utilisé un logiciel de combinaison selon un filtre de Kalman (GLOBK) permettant d'inclure les résultats du calcul de la Scripps sur le réseau permanent IGS.

Il permet, à partir de plusieurs solutions journalières consécutives et indépendantes, d'obtenir une nouvelle solution combinée sur plusieurs jours, et, dans le cas qui nous intéresse, des nouveaux paramètres d'orbite ajustés.

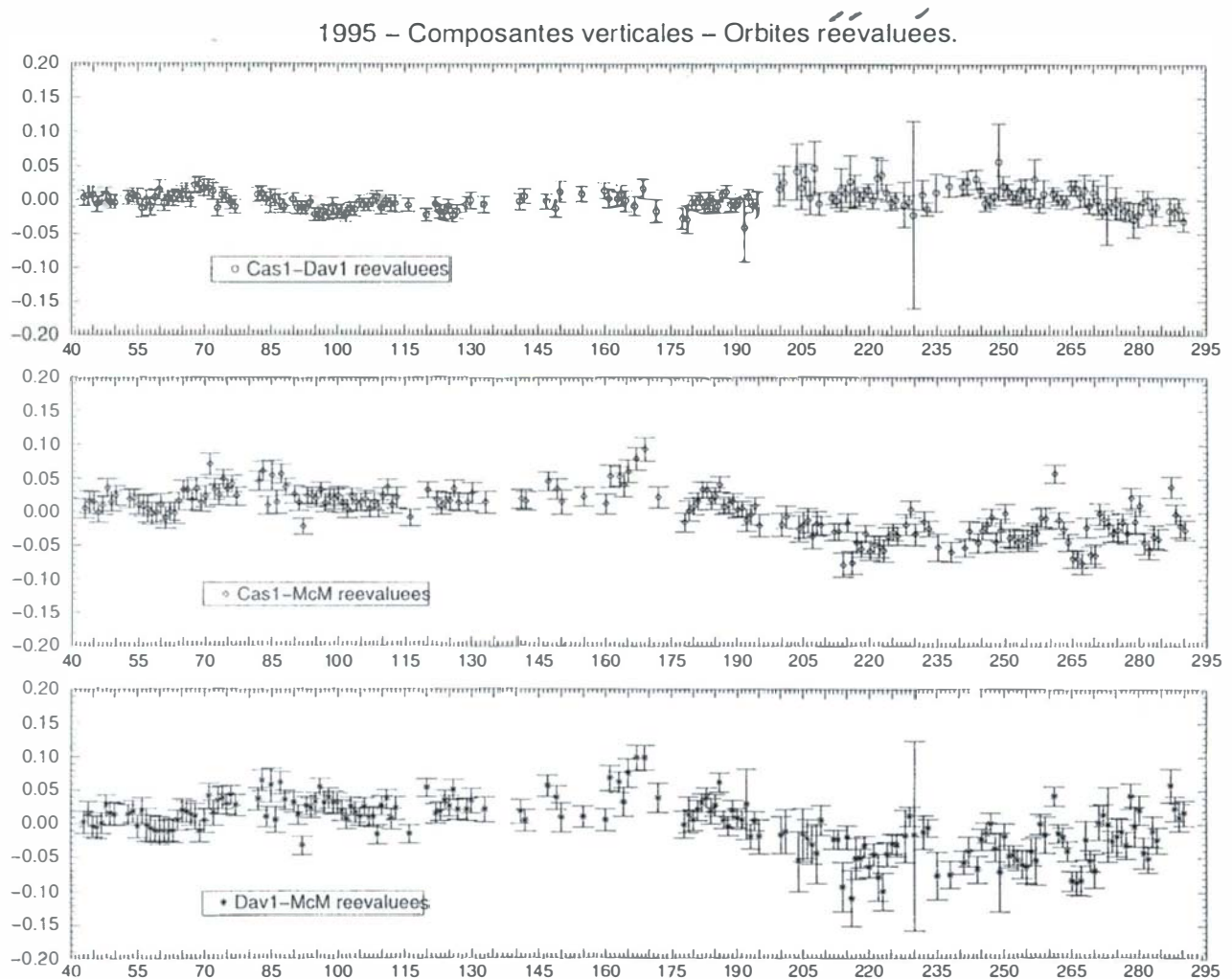


figure C.4.6.4 : exemple de série temporelle : réseau à trois stations, échelle selon les jours de 1995

Répétabilité

On cherche habituellement, par la technique GPS, à obtenir des mesures qui se répètent le mieux possible d'un jour sur l'autre. Un critère d'évaluation de la qualité de la solution est donc l'écart quadratique moyen pondéré d'une série continue de quelques jours à leur moyenne, qu'on appelle répétabilité.

On présente ici les répétabilités obtenues par l'une et l'autre technique de calcul.

Elles sont calculées sur des séries continues de six jours, et l'on en fait ensuite la moyenne pour chaque composante et chaque ligne de base. On constate que, quelles que soient la composante et la ligne de base, la répétabilité de courtes séries temporelles est nettement améliorée par la réévaluation des orbites.

Elle se dégrade lorsque la longueur de la ligne de base augmente, et les répétabilités des composantes sont inférieures à celle de la longueur, ce qui laisse penser à un problème lié à l'orientation du réseau.

tableau C.4.6.1

Moyennes des répétabilités sur les différentes lignes de base et pour chaque composante (en millimètres)

Composante		1994		1995	
	Ligne de base	IGS	Réévaluées	IGS	Réévaluées
Est	CasI-DavI	12,29	7,71	11,4	6,47
	CasI McM	34,21	21,86	27,8	17,23
	DavI-McM	46,29	30,86	38,6	22,3
Nord	CasI -DavI	21,21	12,96	15,73	8,77
	CasI McM	19,64	13,43	18,13	10,50
	DavI McM	30,57	19,93	27,10	15,13
Up	CasI -DavI	15,93	10,86	15,23	7,97
	CasI McM	20,0	14,29	19,07	15,73
	DavI McM	27,14	19,86	24,07	19,9
Longueur	CasI -DavI	8,14	4,93	6,97	4,13
	CasI McM	11,0	8,86	10,17	8,23
	DavI McM	13,64	8,79	12,57	9,17

Conclusion

Les améliorations obtenues sur les répétabilités grâce au recalcul des orbites constituent un point important de ce travail.

On cherchera par la suite à analyser de manière précise les séries temporelles obtenues, et à utiliser des critères de qualité plus appropriés que la simple répétabilité.

Un travail sur les contraintes de système de référence imposées à l'inversion doit également être mené.

Enfin, la partie géophysique du sujet mérite encore des approfondissements, en particulier sur les mouvements de la croûte autres que ceux strictement dûs à l'isostasie, et que l'on pourrait également observer dans le signal.

C.4.7 Systèmes de référence terrestres. Réalisations

Claude Boucher et Zuheir Altamimi

Introduction, contexte et objectif de l'étude

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

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 des stations issues de différentes techniques de géodésie spatiale (VLBI, GPS, SLR, DORIS), dans le but d'établir un repère de référence terrestre unifiant les qualités de toutes ces techniques.

Travaux réalisés en 1996

Les thèmes concernés en 1996 par cette activités sont les suivants.

Calcul et analyse de qualité de l'ITRF94

La dernière réalisation en date de l'ITRS est l'ITRF94 dont le calcul et l'analyse ont été achevés en février 1996. Cette réalisation a été obtenue en combinant des solutions de géodésie spatiale (VLBI, GPS, SLR et DORIS) reçues par le Bureau Central de l'IERS en 1995.

Dans le cadre de l'amélioration des produits ITRF, plusieurs aspects nouveaux ont été étudiés et mis en oeuvre dans l'établissement de l'ITRF94, et en particulier :

- les matrices complètes de variances-covariances entre positions et vitesses ont été utilisées,
- des études spécifiques portant sur la qualité des solutions individuelles ont été entreprises en amont du calcul ITRF94 proprement dit,
- les stations de l'ITRF94 ont été classées en fonction de leur qualité de positions et de vitesses.

Pour donner quelques éléments chiffrés, le tableau C.4.4.1 suivant résume les Erreurs Moyennes Quadratiques Pondérées (EMQP) de positions, par technique, et ceci pour les deux combinaisons à 88,0 et à 93,0.

tableau C.4.7.1 :
EMQP des positions par techniques, pour les meilleures solutions individuelles, issues du calcul ITRF94

Technique	Positions à 88, 0 (mm)	Positions à 93,0 (mm)
VLBI	7	6
GPS	23	6
SLR	12	12
DORIS	70	18

L'analyse complète et les résultats de l'ITRF94 sont disponibles sur serveur du laboratoire LAREG et ont été publiés dans la note technique de l'IERS n° 20.

Développement d'un nouveau logiciel de combinaison de positions et vitesses de stations de géodésie spatiale

Dans le cadre de l'amélioration de la réalisation du Système International de Référence Terrestre (ITRS : International Terrestrial Reference System), une étude portant sur la mise en place d'un logiciel de combinaison simultanée de positions et vitesses de stations de géodésie spatiale a été entreprise.

Cette étude trouve sa justification et sa nécessité par le fait qu'on ne pouvait plus (comme on l'a fait jusqu'à présent) séparer l'information de position de sa variation temporelle, étant donné que les deux composantes sont intimement liées par les observations des quelles on les déduit.

Or, il se trouve que jusqu'à la dernière réalisation en date de l'ITRS, ces deux informations (positions et vitesses des stations) ont été estimées par deux logiciels complètement indépendants.

L'objectif principal du nouveau logiciel est de remédier à cette insuffisance et, de plus, de prendre en compte les matrices de variance complètes (en positions et vitesses simultanément) des solutions qu'on combine, par des modèles, à la fois physique et d'estimation rigoureux.

Groupe de travail: ITRF Datum

Dans le souci d'amélioration du système international, un groupe de travail (Working Group on ITRF Datum) a été créé par le Directing Board de l'IERS sur proposition de Claude Boucher, regroupant des chercheurs au niveau international, dont la mission est d'établir des recommandations claires pour :

- d'une part, la réalisation de l'ITRS proprement dite en accord avec les résolutions de l'UGGI et,
- d'autre part, la définition spécifique de l'origin, l'échelle et l'orientation de l'ITRS.

Objectifs en 1997

Les principaux objectifs scientifiques de cette action de recherche s'articulent sur les axes suivants :

- diffusion et valorisation de l'ITRF: Ce travail est basé principalement sur l'amélioration et valorisation de l'ITRF94 d'une part et, d'autre part, l'entretien du réseau des stations ITRF et en particulier l'amélioration des collocations,
- validation et maintenance du nouveau logiciel de combinaison de positions et vitesses,
- établissement d'une nouvelle solution, ITRF96, qui remplacera l'ITRF94, avec toujours un souci permanent de qualité, et notamment en incluant de données récentes pour contribuer à l'amélioration des vitesses des stations de l'ITRF.

Publications

- [ALTAMIMI 96] Z. Altamimi : *Analyse d'un logiciel de combinaison de positions et vitesses tridimensionnelles*, rapport, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [ALTAMIMI et al 96a] Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *The International Terrestrial Reference Frame : Results and Quality Assessment*, Russian Conference on Modern Problems and Methods of Astronomy and Geodynamics, 23-28 septembre 1996, Saint-Petersbourg (Russie), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [ALTAMIMI et al 96b] Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *Preliminary Analysis for ITRF-C1 solution*, ITRF Workshop, 10 octobre 1996, Observatoire de Paris (F), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [ALTAMIMI et al 96c] Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *Terrestrial Reference Frame : Simultaneous Combination of Station Positions and Velocities of Various Space Geodetic Networks*, AGU Fall Meeting, 15-19 septembre 1996, San Francisco, Ca (USA), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [ALTAMIMI, SILLARD 96] Z. Altamimi & P. Sillard : *Le Système International de Référence Terrestre*, in *Revue Internationale de Géomatique*, volume 6, n° 2-3/1996, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [BOUCHER et al 96] C. Boucher, Z. Altamimi, M. Feissel & P. Sillard : *Results and Analysis of the ITRF94*, IERS Technical Note 20, Observatoire de Paris, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [BOUCHER, ALTAMIMI 96] C. Boucher & Z. Altamimi : *International Terrestrial Reference Frame, GPS World*, volume 7, Number 9, September 1996, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [SILLARD, ALTAMIMI 96] P. Sillard & Z. Altamimi : *Manuel de description et d'utilisation du logiciel combinaison ...* (en cours), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [WILLIS, ALTAMIMI 96] P. Willis & Z. Altamimi : *Site velocities estimation using the DORIS system in a multisatellite mode*, AGU Spring Meeting, Baltimore (USA), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.

La liste suivante contient les références des publications issues du programme de recherche 1996. 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 01.43.98.83.19
télécopie 01.43.98.81.71**

courrier électronique : melot@cogit.ign.fr

Thèses de doctorat

[ABBAS 94] I. Abbas : *Base de données vectorielles et erreur cartographique : problèmes posés par le contrôle ponctuel; une méthode alternative sur la distance de Hausdorff : le contrôle linéaire*, doctorat de l'Université Paris-7, IGN, ENSG-Sciences de l'Information Géographique, IGN-SR-940005/X-THE, soutenue le 10 juin 1994.

[BOCK 96] O. Bock : *Etude et réalisation d'un télémètre laser aéroporté en champ large sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol. Etude de l'adaptation du système à un véhicule satellitaire*, IGN-SR-960004/L-THE, 12 décembre 1996.

[GUÉRIN 96b] Ph. Guérin : *Apport des Cartes Topographiques pour l'Analyse de Scène en Imagerie Aérienne : Application à la Détection du Réseau Routier*, thèse de Doctorat de l'Université Paris-7, Denis Diderot IGN-SR-960010/C-THE, octobre 1996.

[PLAZANET 96] C. Plazanet : *Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique (application aux routes)*, thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, IGN-SR-960017/S-THE, 3 octobre 1996.

[RUSKONÉ 96b] R. Ruskoné : *Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données géographiques*, thèse de l'Université de Marne-la-Vallée, IGN-SR-960011/C-THE, 4 octobre 1996.

[RUSKONÉ 96c] R. Ruskoné : *Road Network automatic Extraction : Application to the Production of cartographic data*, thèse spécialité : Sciences de l'Information géographique, Université de Marne-la-Vallée, IGN-SR-960011/C-THE, 4 octobre 1996.

Publications

[AIRAULT 94a] S. Airault & O. Jamet : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aériennes*, in Actes du congrès RFIA, Paris (F), vol. 1, pp. 519-531, IGN-SR-940001/C-COM, janvier 1994.

[AIRAULT 94b] S. Airault, R. Ruskoné & O. Jamet : *Road detection from aerial images : a cooperation between local and global methods*, Image and Signal Processing for Remote Sensing, Satellite Remote Sensing I, SPIE, vol. 2315, pp. 508-518, Rome (Italie), IGN-SR-940019/C-COM, septembre 1994.

[AIRAULT 95] S. Airault & O. Jamet : *Evaluation of the operability of a semi-automatic road network capture process*, Digital Photogrammetry and Remote Sensing'95, SPIE, volume 2646, pp. 180-191, Saint-Petersburg (Russie), IGN-SR-950003/C-COM, juin 1995.

[AIRAULT 96a] S. Airault, O. Jamet & F. Leymarie : *From manual to automatic stereoplottting : evaluation of different road network capture process*, ISPRS congress, Vienne (A), IGN-SR-960021/S-COM, juillet 1996.

[AIRAULT 96c] S. Airault : *De la base de données à la carte : une approche globale pour l'équarrissage de bâtiments*, in Revue Internationale de Géomatique, Hermès, IGN-SR-960036/S-ART, 1996

[ALTAMIMI et al 96a] Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *The International Terrestrial Reference Frame : Results and Quality Assessment*, Russian Conference on Modern Problems and Methods of Astronomy and Geodynamics, 23-28 septembre 1996, Saint-Petersbourg (Russie), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.

- [ALTAMIMI et al 96b] Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *Preliminary Analysis for ITRF-C1 solution*, ITRF Workshop, 10 octobre 1996, Observatoire de Paris (F), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [ALTAMIMI et al 96c] Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *Terrestrial Reference Frame : Simultaneous Combination of Station Positions and Velocities of Various Space Geodetic Networks*, AGU Fall Meeting, 15-19 septembre 1996, San Francisco, Ca (USA), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [ALTAMIMI, SILLARD 96] Z. Altamimi & P. Sillard : *Le Système International de Référence Terrestre*, in *Revue Internationale de Géomatique*, volume 6, n° 2-3/1996, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [BAILLARD 96b] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Extraction and Characterization of Above-Ground Areas in a Peri-Urban Context*, IAPR/TC7 Workshop on Methods for Extracting and Mapping Buildings, Roads and other Man-made Structures from Images, Graz (Austria), IGN-SR-960019/C-COM, septembre 1996.
- [BAILLARD 96c] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Extraction of Above-Ground Areas and Application to DTM Generation in a Urban Context*, EUROPTO Conf. on Image and Signal Processing for Remote Sensing, Taormina (I), IGN-SR-960020/C-COM, septembre 1996.
- [BAILLARD et al 96] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Appariement stéréoscopique d'images aériennes en milieu péri-urbain*, RFIA'96, Rennes (F), IGN-SR-960006/C-COM, janvier 1996.
- [BARRAULT 95a] M. Barrault : *An Automated System for Linear Feature Name Placement which Complies with Cartographic Quality Criteria*, AutoCarto12, pp. 321-330, IGN-SR-950005/S-COM, mars 1995.
- [BARRAULT 95b] M. Barrault : *Une méthode de placement automatique des toponymes des objets linéaires avec une qualité cartographique*, ACI, Barcelone (E), IGN-SR-950018/S-COM, septembre 1995.
- [BOCK et al 95] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & Fourmaintraux : *Development of a new airborne laser subsidence measurement system, aiming at mm-accuracy*, au Fifth International Symposium on Land Subsidence, FISOLS'95, La Haye (NL), IGN-SR-950001/L-COM, octobre 1995.
- [BOCK et al 96a] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & J. Pelon : *Ranging performance evaluation of the wide-angle laser ranging system*, IEEE Tr. on Geoscience and Remote Sensing, IGN-SR-960009/L-COM, 1996.
- [BOCK et al 96b] O. Bock, M. Kasser & Ch. Thom : *A Wide Angle Airborne or Spaceborne Laser Ranging Instrumentation for Subsidence Measurement*, Tenth International Workshop On Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (China), 11-15 novembre 1996, IGN-SR-960010/L-COM, 1996.
- [BORDES 96a] G. Bordes, Ph. Guérin, G. Giraudon & H. Maître : *Contribution of External Data to Aerial Image Analysis*, ISPRS 96, Commission IV, Vienne (A), IGN-SR-960017/C-COM, juillet 1996.
- [BOTTON et al 1996] S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even & P. Willis : *GPS : Localisation et navigation*, Conseil National de l'Information Géographique, Groupe de Travail : Positionnement Statique et Dynamique, Ed. Hermès IGN/LAREG, 1996.
- [BOUCHER et al 96] C. Boucher, Z. Altamimi, M. Feissel & P. Sillard : *Results and analysis of the ITRF'94*, IERS technical note 20, 1996.
- [BOUCHER, ALTAMIMI 96] C. Boucher & Z. Altamimi : *International Terrestrial Reference Frame*, *GPS World*, volume 7, Number 9, September 1996, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [CHEYLAN et al 96] JP. Cheylan, C. Mende, L. Raynal & TS. Yeh : *Temps et base de données spatiales : vers un cadre conceptuel*, congrès Science et Défense'96, La Villette, Paris (F), 25-26 janvier 1996, in actes pp. 123-134, IGN-SR-960015/S-COM, 1996.
- [DESEILLIGNY 95] G. Stamon & M. Pierrot Deseilligny : *Document Image Analysis in Cartography*, Second Asian Conférence on Computer Vision, Singapore, vol. 3, pp. 378-383, IGN-SR-950038/C-COM, décembre 1995.
- [DESEILLIGNY 96] M. Pierrot Deseilligny & H. Le Men : *Correction d'erreurs par apport de connaissances sur le langage dans la lecture des écritures sur cartes scannées*, Quatrième Colloque National sur l'Écrit et le Document, Nantes (F), pp. 109-116, IGN-SR-960022/C-COM, juillet 1996.
- [DEVOGELE et al 96a] Th. Devogele, J. Trevisan & L. Raynal : *Designing and Producing a Multi-Scale Database from Mono-Scale Databases*, Geoinformatics'96, Palm Beach (USA), in Actes pp. 14-25, IGN-SR-960014/S-COM, avril 1996.
- [DEVOGELE et al 96b] Th. Devogele, J. Trevisan & L. Raynal : *Building a Multi-Scale Database with Scale-Transition Relationships*, Spatial Data Handling, Delft (NL), in Actes pp. 6.19-6.33, IGN-SR-960018/S-COM, août 1996.
- [DEVOGELE et al 96c] Th. Devogele, J. Trevisan & L. Raynal : *Processus de constitution d'une Base de Données Multi-Échelles*, in *Revue Internationale de Géomatique*, vol 6, n° 2-3, Hermès, pp. 249-263, IGN-SR-960019/S-ART, 1996.
- [DEVOGELE, RAYNAL 96] T. Devogele & L. Raynal : *Modelling a multi-scale database with scale-transition relationships*, Samos'96, 19-21 avril 1996, Ile de Samos (Grèce), Ed : T. Sellis & D. Georgoulis, pp. 83-93, IGN-SR-960013/S-COM, 1996.
- [DIAMENT et al 95] M. Diament, Ph. Jousset, F. Beauducel, S. Dwipa & Th. Duquesnoy : *Microgravity and elevations variations monitoring on Merapi Volcano (Indonesia)*, International Union of Geodesy and Geophysics, XXI General Assembly, Boulder USA), IGN-SR-950010/L-COM, 1995.
- [DUQUESNOY et al 94] Th. Duquesnoy, E. Barrier, M. Kasser, M. Aurelio, R. Gaulon, RS. Punongbayan, C. Rangin and the french-Philippine Cooperation Team : *Detection of creep along the Philippine fault : first results of geodetic measurements on Leyte island, central Philippine*, in *Geophysical Research Letters*, vol. 21, pp. 975-978, June 1, IGN-SR-940005/L-ART, 1994.
- [DUQUESNOY et al 95a] Th. Duquesnoy, E. Barrier & M. Kasser : *Geodetic Survey of the Philippine Fault*, in *Terra abstracts*, 7, EUG, Strasbourg (F), IGN-SR-950003/L-ART, 1995.
- [DUQUESNOY et al 96] Th. Duquesnoy, O. Bellier, M. Kasser, M. Sébrier, Ch. Vigny & I. Bahar : *Deformation related to the 1994 Liwa earthquake derived from Geodetic Measurements*, in *Geophys. Res. Let.*, IGN-SR-960002/L-ART, 1996.
- [FRITSCH 96] E. Fritsch : *Mechanical approach of Generalisation*, GISR-UK'96, IGN-SR-960043/S-COM, 1996.
- [FRITSCH, LAGRANGE 95] E. Fritsch & JPh. Lagrange : *Spectral representation of linear features for generalisation*, COSIT'95, p 157-171, IGN-SR-950037/S-COM, 1995.

- [GONCALVES 96a] G. Gonçalves : *Qualités requises en modélisation numérique du relief: les problèmes à résoudre*, in 1/2 Journée Doctorants : Mini-Colloque en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, IGN-SR-960023/C-COM, 1996.
- [GONCALVES 96b] G. Gonçalves : *Constructing digital terrain models from contour lines and morphologic points*, in III Euro-Conference en Systèmes d'Information Géographique, Madrid (E), IGN-SR-960024/C-COM, 1996.
- [GONCALVES 96c] G. Gonçalves : *Aperfeiçoamento da qualidade de um MDT obtido a partir de curvas de nível e pontos cotados*, in Conferência de Cartografia e Geodesia. Lisboa (P), IGN-SR-960025/C-COM, 1996.
- [GUÉRIN 96a] Ph. Guérin : *Apport des cartes topographiques pour l'analyse de scène en imagerie aérienne*, in Revue Internationale de Géomatique, vol. 6, pp. 175-181, IGN, SR-960009/C-ART, novembre 1996 .
- [GUÉRIN, BORDES 96] Ph. Guérin & G. Bordes : *Contribution of external data to aerial image analysis*, Vienne (A), in Proceedings ISPRS'96, vol. XXXI, tome B4, pp. 134-138, IGN-SR-960017/C-COM, juillet 1996.
- [HANGOUEÛT 96a] JF. Hangouët : *Automated generalization fed on lated geographical phenomena*, Intercarto2 : GIS for environmental studies & mapping, Irkutsk (Russie), 26-29 juin 1996, IGN-SR-960008/S-COM, 1996.
- [HANGOUEÛT 96b] JF. Hangouët : *City-scape generalization based on structural principles*, GISR-UK'96, Cambridge (UK), in Proceedings, pp. 221-226, IGN-SR-960024/S-COM, avril 1996.
- [HANGOUEÛT, REGNAULD 96] JF. Hangouët & N. Regnaud : *Analyse des îlots urbains pour la généralisation contextuelle*, article à paraître dans la Revue Internationale de Géomatique, Ed : Hermès, Paris (F), IGN-SR-960023/S-ART, 1996.
- [HARVEY, VAUGLIN 96] F. Harvey & F. Vauglin : *Geometric Match Processing : Applying Multiple Tolerances*, communication soumise à SDH'96, août 96, IGN-SR-960001/S-COM, 1996.
- [JIANG Z. 96a] Z. Jiang : *Geoid prediction using GPS levelling points and digital terrain model - a new French geoid determination*, in Proceedings XXIth EGS Meeting, pp. 121-128, 1996.
- [JIANG Z. et al 96a] Z. Jiang, G. Balmino, H. Duquenne : *On the numerical approximation of the errors in a GPS aided gravimetric geoid determination*, in Proceedings XXIth EGS Meeting, pp. 57-65, 1996.
- [JIANG Z. et al 96b] Z. Jiang, H. Duquenne : *On the combined adjustment of a geometrically determined geoid and GPS levelling stations*, Journal of Geodesy, 70, 505-514, 1996.
- [JIANG Z. et al 96c] Z. Jiang, H. Duquenne : *On fast integration in geoid determination*, Journal of Geodesy, 71, 2, 59-69, 1996.
- [JOUSSET et al 96] P. Jousset, S. Dwipa, F. Beauducel, T. Duquesnoy & M. Diamant : *Temporal gravity at Merapi during the 1993-1995 crisis : an insight into the dynamical behavior of volcanoes*, in Journal of Volcanological and geothermal Research, IGN-SR-960015/L-ART, 1996.
- [JURVILLIER, THOM 96a] I. Jurvillier & Ch. Thom : *IGN New Aerial Digital Frame Camera for Photogrammetry*, in Proceedings of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, vol. 2, pp. 156-164, IGN-SR-960002/L-COM, 24-27 juin 1996,
- [JURVILLIER, THOM 96b] I. Jurvillier & Ch. Thom : *Premières images de la nouvelle caméra aérienne numérique*, in Revue Internationale de Géomatique, vol. 6, n° 2-3/1996, pp. 163-174, IGN-SR-960005/L-ART, 1996.
- [KASSER, GOUPIL 96] M. Kasser & B. Goupil : *The polarization behaviour of cube corner retroreflectors used in SLR satellites*, Tenth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (China), IGN-SR-960007/L-COM, 11-15 novembre 1996
- [KASSER, GOUPIL 96] M. Kasser & B. Goupil : *The polarization behaviour of cube corner retroreflectors used in SLR satellites*, Tenth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (China), IGN-SR-960007/L-COM, 11-15 novembre 1996
- [KASSER, THOM 96] M. Kasser & Ch. Thom : *Proposition for a new SLR methodology using CW or long pulse LASERs*, Tenth International Workshop On Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (China), IGN-SR-960008/L-COM, 11-15 novembre 1996.
- [KASSER, THOM 96] M. Kasser & Ch. Thom : *Proposition for a new SLR methodology using CW or long pulse LASERs*, Tenth International Workshop On Laser Ranging Instrumentation, Shanghai (China), IGN-SR-960008/L-COM, 11-15 novembre 1996.
- [LATARGET et al 94] S. Latarget, C. Mach & S. Motet : *Gestion de l'historique de l'information localisée par des mutations. Les Journées de la Recherche CASSINI*, Lyon (F), IGN-SR-9400032 /S-COM, 1994.
- [LECORDIX et al 94] F. Lecordix, C. Plazanet, F. Chirié, JPh. Lagrange, T. Banel, & Y. Cras : *Automated name placement on map under high quality cartographic constraints*, EGIS'94, vol. 1, pp. 22-32, IGN-SR-940019/S-COM, 1994.
- [LECORDIX et al 97] F. Lecordix, C. Plazanet & JPh. Lagrange : *PlaGe : a Platform for research in Generalization. Application to caricature*, in Geoinformatica en 1997, IGN-SR-970022/S-ART, 1997.
- [LECOURT 96] F. Lecourt & MP. Deseilligny : *Algorithme de reconstruction d'éléments rectilignes dans une image vecteur*, 4th Colloque National sur l'Écrit et le Document, Nantes (F), pp.101-108, IGN-SR-960001/C-COM, juillet 1996.
- [LEMARIÉ, RAYNAL 96] C. Lemarié & L. Raynal : *Geographic Data Matching : first Investigations for a generic Tool*, GIS-LIS'96, Denver, Co (USA), 19-21 novembre 1996, IGN-SR-960036/S-COM, 1996.
- [LEYMARIE 96] F. Leymarie, N. Boichis, S. Airault & O. Jamet : *Towards the automation of road networks extraction processes*, GIS & Remote Sensing Data Management, Satellite Remote Sensing III, Taormina (I), , IGN-SR-960026/C-COM, septembre 1996.
- [MARIANI 96a] R. Mariani, F. Lecourt, M. Pierrot Deseilligny, Y. Lecourtier, J. Labiche & R. Mullet : *Interprétation de cartes géographiques. Algorithmes de reconstruction des réseaux hydrographiques et routiers*, 10ème Congrès RFIA Rennes (F), IGN-SR-960002/C-COM, pp. 34-42, 1996.
- [MARIANI 96b] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, Y. Lecourtier & J. Labiche : *Geographic Map Understanding. Attribute Computation for Hydrographic Network Reconstruction* » Southern Symposium on Image Analysis and Interpretation, San Antonio (USA), IGN-SR-960003/C-COM, avril 1996.

- [MARIANI 96c] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, Y. Lecourtier & J. Labiche : *Reconstruction de surfaces et extraction de lignes tirées pour l'interprétation des cartes géographiques au 1 : 25.000*, Quatrième Colloque National sur l'Écrit et le Document, Nantes (F), pp. 31-38, IGN-SR-960004/C-COM, juillet 1996.
- [MARIANI et al 96a] R. Mariani, F. Lecourt, M. Pierrot Deseilligny & Y. Lecourtier : *Interprétation de cartes géographiques. Algorithmes de reconstruction des réseaux hydrographiques et routiers*, RFIA'96, IGN-SR-960002/C-COM, 1996.
- [MARIANI et al 96b] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny & Y. Lecourtier : *Geographic Map Understanding. Attributes Computation for hydrographic Network*, IEEE, SSIAl'96, San Antonio (USA), 8-9 avril 1996, IGN-SR-960003/C-COM, 1996.
- [MARIANI et al 96c] R. Mariani, F. Lecourt, M. Pierrot Deseilligny & P. Labiche : *Lecture automatique des cartes géographiques, algorithmes de reconstruction des réseaux hydrographiques et routiers*, 10ème congrès "Reconnaissance des formes et IA", RFIA'96, Rennes (F), IGN-SR-960005/C-COM, janvier 1996.
- [MONIER 96a] P. Monier : *Relief modeling, a Step for environmental Mapping*, Intercarto 2 : GIS for environmental studies & mapping, Irkutsk (Russie), 26-29 juin 1996, IGN-SR-960005/S-COM, 1996.
- [MONIER 96b] P. Monier : *Automated Generalization of Relief in the GIS*, symposium international Conference on GIS in Urban, environmental and regional Planning, Ile de Samos (Grèce), 19-21 avril 1996, IGN-SR-960006/S-COM, 1996.
- [MONIER 96c] P. Monier : *A heuristic approach to automated generalization of relief in GIS modeling*, GISR-UK'96, Canterbury (UK), 10-12 avril 1996, IGN-SR-960041/S-COM, 1996.
- [MONIER et al 96] P. Monier, E. Beauvillain & O. Jamet : *Extraction d'éléments caractéristiques pour une généralisation automatique du relief*, in Revue Internationale de Géomatique 6 (2-3), 191-201, IGN-SR-960040/S-ART, 1996.
- [PIERROT 94] M. Pierrot Deseilligny : *Lecture automatique de cartes scannées*, in Bulletin d'information de l'IGN n° 64, Activités Recherche 1994, pp. 31-36, IGN, DT, 1995.
- [RAYNAL 96] L. Raynal : *Some Elements for modelling Updates in topographic Databases*, GIS-LIS'96, Denver, Co (USA), 19-21 novembre 1996, IGN-SR-960030/S-COM, 1996.
- [RAYNAL et al 96] L. Raynal et al : *Gérer et générer des données spatiales hiérarchisées* (Coordination pour l'Analyse Spatiale et les Systèmes d'Information géographique Intelligents (CASSINI), sous-axe B1 du Programme de Recherche sur les SIG, IGN-SR-960039/S-COM, 1996.
- [REGNAULD 96] N. Regnaud : *Structure recognition and qualification for building generalization : GIS for environmental studies & mapping*, Irkutsk (Russie), 26-29 juin 1996, IGN-SR-960009/S-COM, 1996.
- [REGNAULD 96] N. Regnaud : *Recognition of building clusters for generalisation*, SDH'96, vol. 1, pp. 4B1-4B14, Delft (NL), IGN-SR-960044/S-COM, août 1996.
- [ROTHACHER et al 96] M. Rothacher, G. Beutler, E. Brockmann, L. Mervart, S. Schaer, T.A. Springer, U. Wild, A. Wiget, C. Boucher & H. Seeger : *Annual Report 1995 of the CODE Analysis Center of the IGS*, 1996.
- [RUAS, PLAZANET 96] A. Ruas & C. Plazanet : *Strategies for automated generalization*, SDH'96, vol. 1, pp. 6.1-6.18, Delft (NL), IGN-SR-960045/S-COM, août 1996.
- [RUEGG et al 96] J.C. Ruegg, J. Campos, R. Armijo, S. Barrientos, P. Briole, R. Thiele, M. Arancibia, J. Canuta, T. Duquesnoy, M. Chang, D. Lazo, H. Lyon-Caen, L. Ortlieb, J.C. Rossignol & L. Serrurier : *The Mw = 8,1 Antofagasta (North Chili) earthquake of July 30, 1995 : first results from teleseismic and geodetic data*, in Geophys. Res. Lett., 23, 9, 917-920, IGN-SR-960012/L-ART, 1996.
- [RUSKONÉ 94] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road network interpretation : a topological hypothesis driven system*, ISPRS, commission III symposium, pp. 711-717, Munich (D), IGN-SR-940046/C-COM, septembre 1994.
- [RUSKONÉ 95] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road network extraction by local context interpretation*, Image and Signal Processing for Remote Sensing, Satellite Remote Sensing II, SPIE, volume 2315, pp. 508-518, Paris (F), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR-950031/C-COM, septembre 1995.
- [RUSKONÉ 96a] R. Ruskoné, L. Guigues, S. Airault & O. Jamet : *Vehicle Detection on Aerial Images : A Structural Approach*, in ICPR Proceedings, vol III, pp. 900-904, Vienna (A), IGN-SR-960014/C-COM, septembre 1996.
- [RUSKONÉ 96c] R. Ruskoné & S. Airault : *Vers une interprétation automatique du réseau routier sur images aériennes : détection et analyse des carrefours*, in Revue Internationale de Géomatique, volume 6, n° 2-3, Hermès, IGN-SR-960015/C-ART, novembre 1996.
- [RUSKONÉ, AIRAULT 96] R. Ruskoné & S. Airault : *Vers une interprétation automatique du réseau routier sur images aériennes; détection et analyse des carrefours*, in Revue Internationale de Géomatique, IGN-SR-960015/C-ART, 1996.
- [SILLARD 96b] P. Sillard : *Some preliminary results on monthly solutions*, ITRF Workshop, Saint-Mandé, IGN/LAREG CM003, 1996.
- [SILLARD 96d] P. Sillard : *Quelques éléments en vue d'une approche relativiste du géoïde*, in Actes du congrès Systèmes de références spatio-temporels, 1996.
- [SILLARD 97] P. Sillard & C. Boucher : *Algebraic minimum constraints for reference frame datum definition*, soumis au Journal of Geodesy, 1997.
- [SILLARD, BOUCHER 96] P. Sillard & C. Boucher : *Improvement of the transformation between ITRF and Doppler-Realized WGS84*, in Journal of Geodesy, vol. 70, n° 11, 1996.
- [SILLARD, BOUCHER 97] P. Sillard & C. Boucher : *Algebraic minimum constraints for reference frames datum definition*, soumis au Journal of Geodesy, 1997.
- [SPACCAPIETRA et al 96] S. Spaccapietra, C. Parent & T. Devogele : *Conflicts in spatial Database Integration, Parallel and distributed Computing Systems*, 25-27 septembre, Dijon (F), IGN-SR-960005/S-COM, 1996.
- [SPACCAPIETRA et al 98] Thomas Devogele, Christine Parent & Stefano Spaccapietra : *On Spatial Database Integration*, soumis à IJGIS'98, IGN-SR-980001/S-COM, 1996.

- [THOM 96a] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Fabrication d'une caméra numérique aérienne*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 65, pp. 20-25, 1996
- [VAUGLIN 96b] : François Vauglin : *Probability Assessments for the Use of Geometrical Metadata*, GISDATA'96 Summer Institute, Berlin (D), IGN-SR-960021/S-COM, juillet 1996.
- [VAUGLIN, HARVEY 96] : Francis Harvey & François Vauglin, *Geometric match processing: applying multiple tolerances*. 7th International Symposium on Spatial Data Handling, Delft (NL), IGN-SR-960001/S-COM, août 1996.
- [VAUGLIN, YOUSFI 96] : article sur la *Mesure de la précision dans les bases de données géographiques*, publié dans la revue de l'ANITOPS, Maroc, IGN-SR-960007/S-ART, 1996.
- [WILLIS 1996] P. Willis : *Groupe de Travail permanent du CNIG : Positionnement Statique et Dynamiques*, in Revue XYZ, 68, 23-25, IGN/LAREG, 1996.
- [WILLIS 96a] P. Willis : *Le système DORIS : présentation, rôle et recherches menées à l'IGN*, in Revue Internationale de Géomatique, 6, 2-3, 289-304, 1996.
- [WILLIS et al 96] P. Willis & C. Boucher : *GPS, GNSS et les références géodésiques : problèmes ou progrès pour les topographes*, in Revue XYZ, 67, 57-61, 1996; republié dans Revue Navigation, 45, 177, 60-69, IGN/LAREG, janvier 1997.
- [WILLIS, ALTAMIMI 96] P. Willis & Z. Altamimi : *Site velocities estimation using the DORIS system in a multisatellite mode*, AGU spring meeting, Baltimore (USA), IGN/LAREG CM027, 1996.

Rapports internes, notes techniques, rapports d'études, compte-rendus

- [AIRAULT 96b] S. Airault : *Mise en production d'un processus de saisie semi-automatique du réseau routier pour la BDTOPPO : conception fonctionnelle et définition de la réalisation*, rapport interne, IGN-SR-960033/C-RAP, septembre 1996.
- [ALTAMIMI 96] Z. Altamimi : *Analyse d'un logiciel de combinaison de positions et vitesses tridimensionnelles*, rapport, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [BADARD 96] T. Badard : *Propagation des mises à jour dans une base de données par analyse des changements géographiques*, rapport interne, IGN-SR-9600 46/S-RAP, 1996.
- [BDCARTO 95] *Premières mesures de la qualité de la BDCarto : résultats et analyses*, rapport QBDC-YB16, IGN, 1995.
- [BORDES 96b] G. Bordes : *Interprétation d'images aériennes guidée par une base de données cartographiques : application à l'extraction automatique des routes*, rapport de présoutenance, IGN-SR-960016/C-RAP, février 1996. [2]
- [BOTTON 96] S. Botton : *The Reprocessing of the CODE-IGS Data of 1995'*, publication du laboratoire LAREG, série Memorandum, MM16, 1996.
- [BOUCHER et al 96] C. Boucher, Z. Altamimi, M. Feissel & P. Sillard : *Results and Analysis of the ITRF94*, IERS Technical Note 20, Observatoire de Paris, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1996.
- [CASSINI/GIP RECLUS/IGN-COGIT/PRISM 96] CASSINI - GIP Reclus et IGN/COGIT - PRISM : *Gestion du temps dans une base de données de renseignements militaires*, 19 mai 1995, IGN-SR-960028/S-RAP, 1996.
- [COMMUTER 95] L. Raynal, Ph. Jolivet & F. Chirié : *10.5 TTML Specifications, projet Commuter*, IGN-SR-950060/S-RAP, 1995.
- [DAMOUR 96] S. Damour : *Reconstruction des bâtiments à partir d'un plan 2-D, et Annexes*, rapport d'étude, IGN-SR-960034/C-RAP, septembre 1996.
- [DUQUESNOY et al 95b] Th. Duquesnoy, O. Bellier, Ch. Vigny, M. Kasser & M. Sébrier : *Déformation co-sismique du séisme de Liwa du 15 février 1994 et évaluation du risque sismique du sud de Sumatra (Indonésie) : apport des mesures géodésiques*, rapport DRM, IGN-SR-950009/L-RAP, janvier 1995.
- [GUÉRIN 96] Ph. Guérin : *Apport des cartes topographiques pour l'analyse de scène en imagerie aérienne : application à la détection du réseau routier*, rapport de présoutenance, IGN-SR-960008/C-RAP, février 1996.
- [JAMET 96] O. Jamet : *Comparaison d'un modèle à un couple d'images aériennes pour la détection des changements sur le thème bâti*, rapport interne, IGN-SR-960035/C-RAP, août 1996.
- [JOLIVET, RAYNAL 96] Ph. Jolivet & L. Raynal : *Quelle part accorder à la gestion de l'historique dans le processus de mise à jour ? Enquête utilisateurs*, IGN-SR-960020 /S-RAP, 1996.
- [LE MEN 96] H. Le Men : *Habilitation à diriger les recherches, première partie : cartographie semi-automatique de l'évolution de l'occupation des sols par télédétection*, Université René Descartes, IGN-SR-960013/R-RAP, 1996.
- [LEMARIÉ 96] C. Lemarié : *État de l'art sur l'appariement*, rapport technique, IGN-SR-960022/S-RAP, 1996.
- [MOTET 93] S. Motet : *A model for lineage and time management*, ESPRIT BRA AMUSING (EP 6881), Report D2.3.1, 1993.
- [PrEn 12160] *Projet de norme européenne du CEN sur la qualité des données géographiques numériques*, (actuellement soumis à enquête publique).
- [SILLARD 96a] P. Sillard : *Analyse statistique des combinaisons de jeux de coordonnées, proposition de scénario de traitement*, publications du LAREG MM013, 1996.
- [SILLARD 95] P. Sillard, Z. Altamimi & C. Boucher : *Analyses préalables à l'ITRF'94*, publication du LAREG MM 008, novembre 1995.
- [SILLARD 96c] P. Sillard : *The use of orthogonal projectors for sets of coordinates combinations ITRF'96 workshop*, publications du LAREG CM033, 1996.
- [SIMB 96] SIMB : *Service d'Installation et de Maintenance des Balises DORIS, Etat du réseau orbitographique DORIS au 1/1/96*, CNES CT/ED/TU/TD n°96.108, janvier 1996.
- [THOM 96a] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Compte-rendu de la première mission aérienne de la nouvelle caméra numérique, mission sur la ville d'Amiens du 15 janvier 1996*, IGN-SR-960001/L-RAP, 29 janvier 1996.

- [THOM 96b] Ch. Thom & JP. Souchon : *Compte-rendu de la deuxième mission aérienne de la nouvelle caméra numérique, mission sur la ville de Lyon, 22 juillet 1996*, IGN-SR-960003/L-RAP, juillet 1996.
- [WILLIS 96b] P. Willis : *Définition d'un protocole de tests visant à définir une procédure optimale pour obtenir des coordonnées DORIS mensuelles dans un système de référence mondial maintenu de manière fiable dans le temps*, IGN/LAREG SP003, 1996.
- [WILLIS 96e] P. Willis : *Notice utilisateur du logiciel GIPSY/OASIS pour les calculs DORIS à l'IGN*, rapport interne, version 0.2, décembre 1996.
- [WILLIS 96] P. Willis : *Basic considerations on the problem of geodetic references and its implications for the European Radio Navigation Plan*, Note technique, IGN/LAREG MM012, Juin 1996.

Rapports de stage

- [AREIA 96] R. Areia : *Base de données multi-échelles, amélioration de l'appariement entre le réseau BDCarto et BDRoutière*, DESS d'Application de l'Informatique aux Sciences de la Terre, Université P. & M. Curie, IGN-SR-960029/S/STA, 21 octobre 1996.
- [BLAQUIÈRE 96] D. Blaquière : *Placement automatique des toponymes en tenant compte de la projection*, rapport de stage IT3 - DESS de cartographie numérique, IGN-SR-960011/S/STA, soutenu le 13 mai 1996.
- [BOUILLON et al 96] A. Bouillon, A. de la Losa & F. Dubreil : *Calcul de variogramme sur des couples de polygones*, DEA Sciences de l'Information Géographique, projet d'option, Université Marne-la-Vallée et ENSG, IGN-SR-960003/S-STA, 22 mars 1996.
- [BOUSSAROQUE 96] E. Boussaroque : *Sélection des arêtes "à l'ombre" de bâtiments*, stage de fin d'étude, EERIE, Promotion 1996, IGN-SR-960012/C-STA, 1996.
- [CHOUADRA 96] M. Chouadra : *Placement automatique des blasons, compte-rendu des modifications à effectuer dans le programme PAT*, rapport de stage DESS-AIST, IGN-SR-960037/S-STA, 1996.
- [COINTEPAS 96] Yann Cointepas : *Restitution semi-automatique de bâtiments dans des images aériennes stéréoscopiques*, rapport de stage du DEA Traitement des images et du signal, ENSEA, Cergy-Pontoise, IGN-SR-960028/C-STA septembre 1996.
- [DELASNERIE 96] Y. Delasnerie : *Segmentation du relief par agrégation des bassins versants*, DESS d'Application de l'Informatique aux Sciences de la Terre, Université P. & M. Curie, IGN-SR-960031/S-STA, octobre 1996.
- [DJADRI 96] R. Djadri : *Diagrammes de Voronoï généralisés*, DEA Informatique Fondamentale et Applications, Université de Marne-la-Vallée, IGN-SR-960032/S-STA, octobre 1996.
- [FERREIRA 96] P. Ferreira : *Intégration de schémas de données géographiques orientées-objet à différentes échelles*, mémoire de fin de stage DEA SIG, Université de Marne-la-Vallée, IGN-SR-960033/S-STA, soutenu le 26 septembre 1996.
- [FRISCH 96] C. Fritsch et H. de la Grandière : *Reconstruction de bâtiments à partir d'images aériennes à grande échelle et de données stéréoscopiques*, stage d'option de l'École Polytechnique, IGN-SR-960029/C-STA, juillet 1996.
- [GAUTHIER 96] Pascal Gauthier : *Restitution automatique des carrefours simples sur des images aériennes*, rapport de stage du DESS d'Intelligence Artificielle de Paris-6, IGN-SR-960030/C-STA septembre 1996.
- [MARROT 94] JM. Marrot : *Positionnement automatique des kilométrages*, rapport de DESS, IGN-SR-940041/S-STA, juin 1994.
- [MOREL 96] L. Morel : *Etude de l'influence des jeux de référence sur les résultats DORIS (pôle de la rotation terrestre, orbitographie, positionnement)*, rapport de stage, DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, IGN/LAREG MS002, juin 1996.
- [MORISSET 96] B. Morisset : *Simulation pour la hiérarchisation du réseau routier*, rapport de stage EPITA, 1996.
- [MORNAT 96] Jean-Jacques Mornat : *Intégration de contraintes externes dans un algorithme de suivi de routes*, rapport de stage de l'ENSTA, IGN-SR-960031/C-STA, juin 1996.
- [MUSTIÈRE 95] S. Mustière : *Mesures de la qualité de la généralisation du linéaire*, IGN-SR-950044/S-STA, septembre 1995.
- [NICOLAS 95] S. Nicolas : *Extraction automatique du réseau routier par suivi de profil sur images aériennes numérisées*, rapport de stage d'Ingénieur en Télécommunications, IGN-SR-950034/C-STA, juin 1995.
- [NORMANDIN 96] F. Normandin : *Détection de routes sur images aériennes. Application aux routes en forêt*, rapport de stage de fin d'étude d'ingénieur de l'INT, IGN-SR-960018/C-STA, juillet 1996.
- [RAVEL 96] : B. Ravel : *Modélisation des imprécisions géométriques dans les bases de données géographiques, propagations*, 3ème année ENASA, Malakoff (F), IGN-SR-960034/S-STA, soutenance en 1997.
- [SOUCHON 96] JP. Souchon : *Mise en œuvre de la caméra numérique*, projet de stage de filière de troisième année du cycle ITGCE, ENSG, IGN-SR-960006/L-STA, 27 septembre 1996.
- [THOMAS 96] S. Thomas : *Etude de deux serveurs de données géographiques*, rapport d'enseignement par la recherche, 2ème année ENSTA, 48 pages, IGN-SR-960016/S-STA, 10 juin 1996.
- [TREVISAN 96] J. Trevisan : *Amélioration de la qualité du placement automatique des toponymes*, rapport de stage, IT3-DESS de cartographie numérique, IGN-SR-960010/S-STA, soutenu le 13 mai 1996.
- [UNGER 96] V. Unger : *Outils d'assistance au déplacement d'éléments linéaires pour une maquette de généralisation*, DESS d'Application de l'Informatique aux Sciences de la Terre, Université P. & M. Curie, IGN-SR-960035/S-STA, octobre 1996.
- [VADIN 96] M. Vadin : *Placement automatique des écritures sur la TOP100*, IT3-DESS de cartographie numérique, soutenu le 13 mai 1996, IGN-SR-960012/S-STA, 1996.
- [YOUSFI 96] Khalid Yousfi : *Mesure de la précision dans les bases de données géographiques*, stage de 3e année de l'IAV Hassan II, IGN-SR-960043/S-STA, 1996.

Cours

[DEVOGELE et al 96] T. Devogele, J. Trevisan & L. Raynal : *Qualité des données géographiques : la qualité géographique, un état, des concepts, des outils*, Cours DEASIG, IGN-SR-960004/S-ENS, février-mars 1996.

[VAUGLIN 96a] François Vauglin : *La qualité géométrique : un état, des concepts, des outils*, ENSG : cours de DEA SIG, IGN-SR-960004/S-ENS, février 1996.

[WILLIS 96c] P. Willis : *Géodésie Spatiale par méthode dynamique : Applications au positionnement DORIS : 1ère partie*, IGN/LAREG CM024, 1996.

[WILLIS 96d] P. Willis : *Géodésie Spatiale par méthode dynamique : Applications au positionnement DORIS : 2ème partie*, IGN/LAREG CM025, 1996.

Contacts :

Service de la Recherche

Serge Motet - 01.43.98.83.15

Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Image pour la Stéréorestitution (MATIS)

Jean-Daniel Piquet-Pellorce - 01.43.98.80.81

Laboratoire d'Opto-Électronique et de Micro-Informatique (LOEMI)

Christian Thom - 01.43.98.82.40.

Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique (COGIT)

Sylvie Lamy - 01.43.98.84.32

Laboratoire de REcherche en Géodésie (LAREG)

Claude Boucher - 01.64.15.32.50

Directeur de la Publication : Jacques Poulain
Rédacteur en Chef : Serge Motet

Imprimé à l'Institut Géographique National
© Bulletin d'Information de l'IGN

136 bis rue de Grenelle
F-75700 Paris 07 SP

Tél. 01.43.98.80.00

Imprimerie de l'Institut Géographique National
Dépot légal 4e trimestre 1997
N° d'édition : 178 - n° d'impression : 199

