



HAL
open science

La recherche à l'IGN en 1994

Serge Motet, O Jamet, Patrick Julien, Olivier Dissard, Marc Pierrot-Deseilligny, Olivier Bock, Corinne Plazanet, Laurent Raynal, Daniel Piquet-Pellorce, Philippe Guiavarc'H, et al.

► **To cite this version:**

Serge Motet, O Jamet, Patrick Julien, Olivier Dissard, Marc Pierrot-Deseilligny, et al.. La recherche à l'IGN en 1994. Bulletin d'information de l'IGN N°64. 1995. hal-02373006

HAL Id: hal-02373006

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02373006>

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.

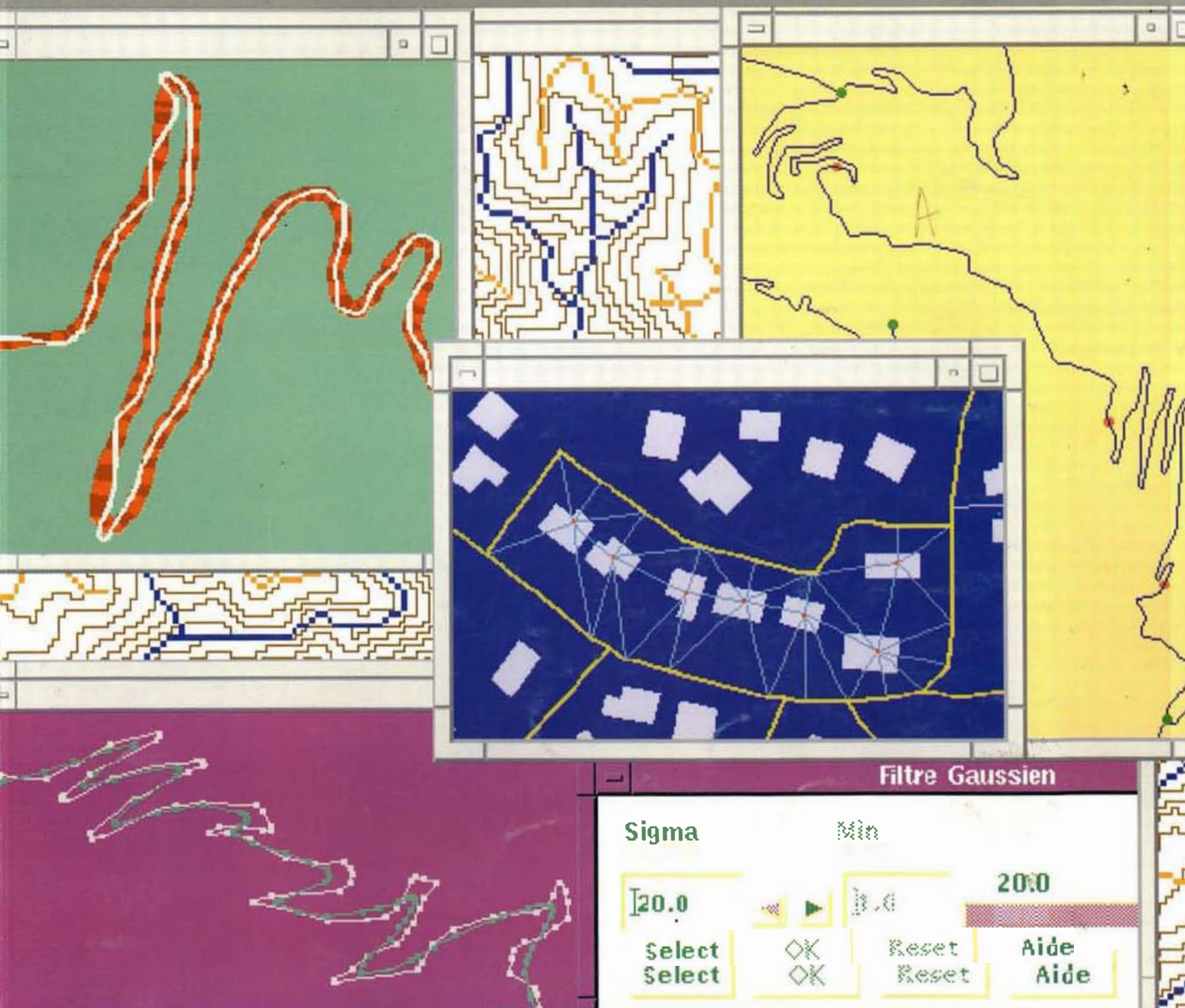
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

BI

INSTITUT
GÉOGRAPHIQUE

BULLETIN D'INFORMATION DE L'IGN

RECHERCHE 94



3 5400 00520364 2

64

Bulletin d'information de l'IGN

n° 64

La recherche en 1994

La recherche en 1994

01 Classement SR-IGN : 95001/R-LIV

02 Livre

03 Directeur de la publication
Jacques POULAIN
IGN
B.P. 68
94160 SAINT-MANDÉ

04 Rédacteur en chef
Serge MOTET

05 Réalisé au Service de la Recherche de l'IGN
IGN
B.P. 68
94160 SAINT-MANDÉ

06 Titre : La recherche en 1994

07 Date d'édition : Août 1995

13 Numéro : 64

15 Collection : bulletin d'information de l'IGN

Résumé : Un tour d'horizon des activités de recherche de l'IGN en 1994 est présenté. On insiste plus particulièrement sur la corrélation automatique, la télémétrie laser, la généralisation cartographique automatique, les bases de données localisées et le traitement numérique du relief, des photos aériennes et des cartes géographiques.

Mot clé principal : Information géographique.

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

BD Alti, BD Carto, BD Topo, Géoroute et FEIV sont des marques déposées de l'Institut Géographique National.

En couverture : La recherche en généralisation cartographique au laboratoire COGIT de l'IGN

- Fond vert : simplification et caricature par approche mécanique;
- Fond magenta : extrait d'une plate-forme de généralisation interactive; développement d'algorithmes tel que le lissage par filtre gaussien;
- Fond jaune : caractérisation du linéaire en vue de l'automatisation des choix des algorithmes de généralisation; segmentation de la ligne en portions homogènes par distribution des points d'inflexion principaux;
- Fond bleu : extrait d'une plate-forme de généralisation à base de règles; calcul d'une triangulation locale pour la répercussion contrôlée des déplacements;
- Fond blanc : caractérisation de l'orographie en vue de l'automatisation des choix des algorithmes de généralisation; identification des réseaux de crêtes et de thalwegs.

Table des matières

A. La recherche à l'IGN.....	5
Structure de la recherche à l'IGN.....	5
Priorités de recherche.....	6
Points marquants de 1994.....	7
Évolution des effectifs.....	8
Déroulement des actions.....	8
Sommaire détaillé.....	10
B. Quelques actions marquantes.....	11
B.1. Extraction du réseau des thalwegs sur un MNT.....	11
B.2. Corrélation par facettes de terrain.....	19
B.3. Interprétation et restitution automatique des bâtiments sur images aériennes.....	25
B.4. Lecture automatique de cartes scannées.....	31
B.5. Développement d'un procédé de télémétrie laser aéroportée à champ large.....	37
B.6. Modélisation de la géométrie des objets linéaires en vue de leur généralisation automatique.....	44
B.7. Prototypage de SGBD Orienté-Objet pour l'information géographique : bilan d'expérience.....	51
C. Bilan des actions de recherche.....	57
C.1. Image et photogrammétrie.....	57
C.1.1. Introduction.....	57
C.1.2. Restitution du relief.....	58
C.1.2.1. Introduction.....	58
C.1.2.2. Élimination du sur-sol isolé.....	58
C.1.2.3. Parallélisation de la corrélation automatique.....	59
C.1.2.4. Fabrication de MNT avec le corrélateur DAUPHIN.....	60
C.1.2.5. Qualité d'un MNT issu de la corrélation automatique de photographies aériennes.....	61
C.1.2.6. Méthodes de lissage d'un MNT brut obtenu par corrélation automatique.....	62
C.1.2.7. Système d'analyse d'images aériennes appliqué à la restitution du relief.....	63
C.1.3. Extraction du réseau routier sur images aériennes.....	64
C.1.3.1. Introduction.....	64
C.1.3.2. Approche semi-automatique.....	64
C.1.3.3. Approche automatique.....	66
C.1.3.4. Interprétation conjointe carte-image.....	67
C.1.3.5. Interprétation d'images aériennes guidée par la BD Cartographique.....	68
C.1.4. Extraction du bâti à partir de photographies aériennes.....	69
C.1.4.1. Introduction.....	69
C.1.4.2. Restitution des bâtiments pour la mise à jour d'une base de données.....	69
C.1.5. Traitement d'images SPOT pour l'occupation du sol.....	71
C.1.5.1. Introduction.....	71
C.1.5.2. Généralisation de la carte d'occupation du sol.....	71
C.1.5.3. Interprétation de l'occupation du sol sur Images SPOT.....	72
C.1.6. Reconnaissance automatique des cartes scannées.....	74
C.1.6.1. Introduction.....	74
C.1.6.2. Analyse multicouches.....	74
C.1.7. Qualité des données.....	76
C.1.7.1. Contrôle linéaire.....	76

C.2.	Instrumentation.....	82
C.2.1.	Caméra à comptage de photons pour l'astronomie.....	82
C.2.2.	Mise en exploitation de la station LASER ultra-mobile.....	83
C.2.3.	Prototype d'une caméra aérienne numérique.....	83
C.2.4.	Exploitation cartographique des images radar.....	85
C.3.	SIG et cartographie.....	87
C.3.1.	Introduction.....	87
C.3.2.	Modélisation temps et espace. Gestion de l'historique.....	88
C.3.3.	Base de données multi-échelles.....	88
C.3.4.	Précision de localisation dans les bases de données géographiques.....	90
C.3.5.	Prototype de SGBDOO localisé.....	92
C.3.6.	Placement automatique des toponymes.....	93
C.3.7.	Problèmes de modélisation en généralisation.....	94
C.3.8.	Généralisation automatique : approche IA.....	96
C.3.9.	Méthodes algorithmiques pour la généralisation automatique.....	98
C.4.	Géodésie.....	100
C.4.1.	Maintenance du système de référence terrestre de l'IERS.....	100
C.4.2.	Détermination du géoïde.....	101
C.4.3.	Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial.....	103
C.4.4.	Le centre de données IGS à l'IGN.....	104
C.4.5.	Étude des déformations du sol par des méthodes géodésiques dans le S.E.asiatique.....	105
D.	Publications.....	106
	Publications.....	106
	Congrès et ateliers.....	107
	Rapports internes, notes techniques, rapports d'étude.....	109
	Rapports de stage ou autres (thèses, troisième cycle, Ingénieur, formation continue).....	110

Un sommaire détaillé se trouve en page 10.

Structure de la recherche à l'IGN

Les missions de recherche sont définies dans le statut de l'IGN : "L'IGN a pour objet... ..c) D'effectuer les recherches d'intérêt général correspondant aux activités mentionnées aux [paragraphe] a et b ..." (les paragraphes a et b sont les missions de production de l'IGN : géodésie, nivellement, photographies aériennes, cartes topographiques, cartes dérivées et thématiques, télédétection, numérisation...).

L'orientation et l'évaluation de la recherche à l'IGN sont du ressort du *Conseil Scientifique et Technique* (CST) et de la *Direction Technique* (DT).

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.

La maîtrise d'ouvrage de la recherche est une attribution de la Direction Technique. Elle s'appuie sur le Schéma Directeur de la Recherche qui fixe les thèmes de recherche.

La recherche est mise en oeuvre par les services de l'IGN. Le principal acteur est le Service de la Recherche (SR). L'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) est appelée à prendre une plus grande part en recherche grâce au rattachement du laboratoire de géodésie à la fin 1994. Les services de production (en particulier IGN-Espace à Toulouse) ont en charge certaines actions.

La structure de recherche est 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
- (* SIG = Système d'Information Géographique)
- Groupe 4 : Géodésie Laboratoire LAREG

Un programme de recherche est présenté chaque année au CST par la Direction Technique en fonction du schéma directeur et des propositions des chercheurs. Ce programme est organisé par groupes. Il est ensuite divisé en actions de recherche (AR). Chaque action de recherche a un responsable, un budget et un suivi comptable.

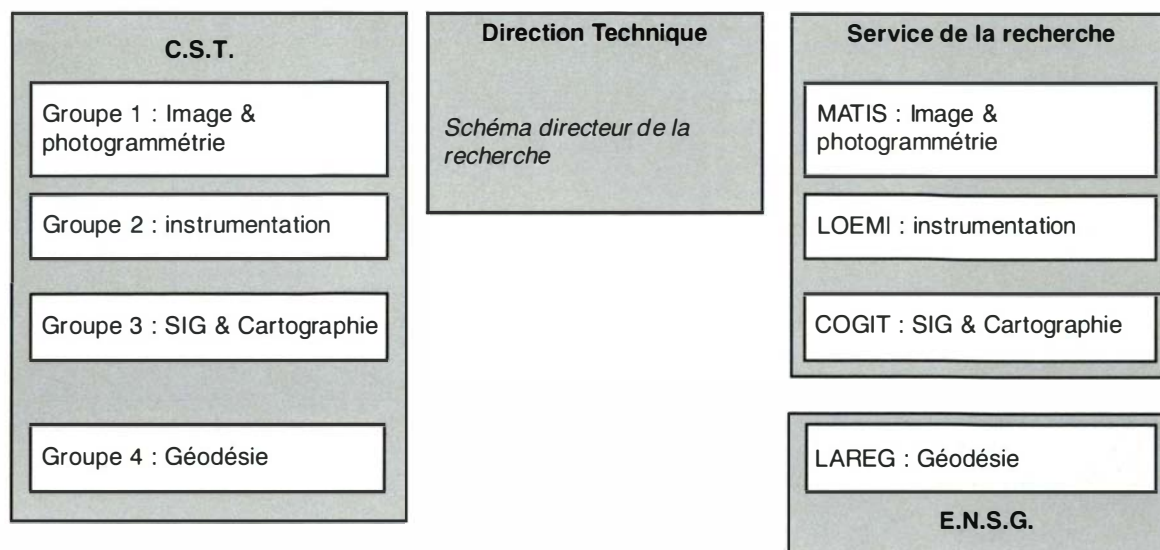


figure A.1
organisation de la recherche à l'IGN

Priorités de recherche

Le Schéma Directeur de la Recherche est élaboré à partir des éléments de l'analyse stratégique de l'IGN. Les principales recherches sont donc liées à la constitution des bases de données (BDTopo principalement) et à l'exploitation de ces bases (gestion et sorties cartographiques). Quelques recherches sont menées sans objectif de production dans des domaines où les compétences de l'IGN peuvent contribuer à l'innovation technologique et au rayonnement scientifique international du pays.

Image et photogrammétrie

En image et photogrammétrie, les recherches portent sur la saisie photogrammétrique de la BD Topo. Elles visent à mettre au point des outils d'analyse d'image pour une automatisation plus ou moins complète des tâches de restitution. Les recherches portent à la fois sur restitution automatique du relief par stéréoscopie et sur la reconnaissance de formes topographiques (routes, bâtiments).

L'objectif à long terme est l'automatisation de la restitution photogrammétrique. Tous les aspects de la topographie sont abordés avec des outils variés :

- restitution du relief par corrélation automatique,
- détection du bâti,
- détection des portions de routes, prolongement des portions, suivi et structuration des graphes,
- détection des réseaux hydrographiques, détection des thalwegs sur modèle numérique de terrain (MNT) corrélé.

Pour le moyen terme, le laboratoire MATIS étudie l'aide à la saisie photogrammétrique de la BD Topo. On vise à mettre au point des outils d'analyse d'image pour une automatisation partielle des tâches de restitution.

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

Instrumentation

La principale action est la mise au point d'une caméra numérique aéroportée. Il s'agit d'un appareil de prise de vue aérienne où la "pellicule" est remplacée par une matrice CCD (à transfert de charge). La réponse de chaque pixel est numérisée dès la prise de vue. La mise au point d'un tel appareil permettra de compléter la chaîne numérique de cartographie depuis l'acquisition jusqu'aux sorties sur papier. C'est aussi une condition à l'efficacité des méthodes d'assistance à la restitution.

Système d'Information Géographique (SIG)

Les recherches portent sur l'amélioration des systèmes actuels dans les domaines :

- de la gestion de la qualité,
- de l'historique des données,
- de la fusion de données de précision différentes.

Les recherches s'appuient très largement sur la technologie "orienté-objet".

Généralisation cartographique

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

Géodésie

Les thèmes de recherche sont :

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

Points marquants de 1994

Image et photogrammétrie

Pour le relief et plus particulièrement pour la corrélation automatique, un outil de première génération a été mis au point. On a posé les bases d'un nouvel outil, d'usage plus général.

Pour le réseau routier, les travaux en mode interactif sont bien avancés et permettent d'envisager un transfert vers la production.

Pour le bâti, les premières études permettent de fixer des orientations à moyen terme.

Les travaux sur les cartes à 1:25 000 scannées avancent de façon sensible.

Instrumentation

Pour le prototype de caméra numérique aéroportée, une optique adaptée a été réalisée, l'ergonomie a été améliorée. D'autre part une enquête dans la communauté photogrammétrique européenne a été réalisée et les contacts pour une réalisation industrielle ont été pris.

SIG et cartographie

Pour le placement des écritures, un industriel a repris le module de placement des écritures horizontales et a réalisé un logiciel qui peut être utilisé pour les cartes à 1:25 000 et pour la carte à 1:1M. Les recherches sur les numéros de routes et les kilométrages ont été poursuivies, avec des résultats tout à fait satisfaisants qui permettent d'envisager l'utilisation en production.

Les recherches en généralisation ont également progressé sur la caractérisation des formes, ouvrant des perspectives pour l'amplification et la simplification du linéaire.

En ce qui concerne les systèmes d'information géographique, l'IGN a contribué activement à la première phase du programme national de recherche sur les SIG (PSIG). La participation de l'IGN s'est articulée autour de trois axes : précision des données, les données multi-échelles et la gestion de l'historique.

Géodésie

L'étude sur la variation à long terme du niveau moyen des mers s'est poursuivie. Elle a été complétée par une proposition pour un réseau européen de marégraphes.

En ce qui concerne les systèmes de référence et l'IERS (service international sur la rotation de la terre), une nouvelle réalisation du système de référence terrestre de l'IERS (ITRS) a été calculée; la contribution du système de positionnement DORIS a été évaluée; la collaboration avec l'IGS (international GPS geodynamic Service) a été étudiée.

Évolution des effectifs

L'année 1994 a été marquée par la stabilisation des effectifs des laboratoires. Cela est dû à deux facteurs : la stabilité du budget de recherche et la fin du regroupement des chercheurs dans les laboratoires.

	Effectifs au 1/1/93	Arrivées (Départs)	Effectifs au 1/1/94	Arrivées (Départs)	(Départs) au 1/1/95
Commandement	5	1 (2)	4	1 (2)	3
COGIT	8	4	12	2 (1)	13
MATIS	10	4	14	5 (3)	16
LOEMI	6	1	7	0	7
LAREG	14	0 (3)	11	0 (3)	8
Total	43	10 (5)	48	8 (9)	47

Déroulement des actions

La répartition des coûts par groupe ou laboratoire est la suivante :

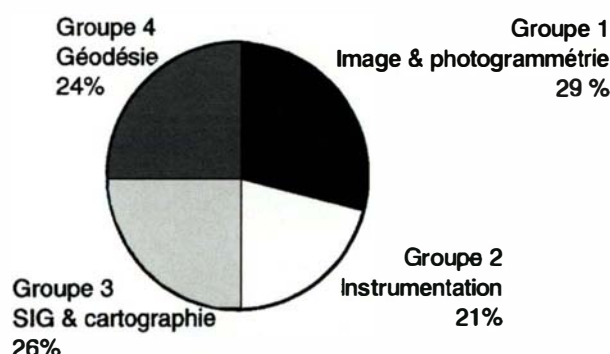


figure A.2
Répartition des coûts

Le tableau suivant donne la liste des chapitres du bulletin et une estimation du coût des actions de recherches dont ils rendent compte. Les coûts contiennent les charges pouvant être directement affectées à chaque action et une partie de la contribution aux structures de l'IGN. Les coûts sont donc donnés dans le seul but d'être comparés. Pour des raisons comptables, certains comptes-rendus n'ont pas pu être raisonnablement associés à des coûts.

Chapitre du bulletin	Intitulé de l'action	Coût (kf)
B.1.	Extraction automatique du réseau de thalwegs sur un MNT	139
B.2.	Corrélation par facette de terrain	362
B.3.	Interprétation et restitution automatique du bâti sur couple de photographies ...	370
B.4.	Lecture automatique de cartes scannées	188
B.5.	Développement d'un procédé de télémétrie laser aéroporté à champ large	774
B.6.	Modélisation de la géométrie des objets linéaires en vue de leur généralisation ...	1 000
B.7.	Prototype de SGBD Orienté-Objet pour l'information géographique	306
C.1.2.2.	Élimination du sur-sol isolé	406
C.1.2.3.	Parralélisation de la corrélation automatique	124
C.1.2.4.	Fabrication de MNT avec le corrélateur Dauphin	78
C.1.3.	Extraction du réseau routier sur images aériennes	1 159
C.1.4.	Extraction du bâti à partir de photos aériennes	(Idem B.3.) 370
C.1.6.	Reconnaissance automatique des cartes scannées	(Idem B.4.) 188
C.1.7.	Contrôle ponctuel et contrôle linéaire	641
C.2.1.	Mise au point et exploitation ... d'une caméra à comptage de photons ...	25
C.2.2.	Mise en exploitation de la station laser ultra mobile	401
C.2.3.	Prototype de caméra aérienne numérique	1 387
C.2.4.	Exploitation cartographique d'images radar	639
C.3.2.	Modélisation temps et espace. Gestion de l'historique dans les SIG	61
C.3.3.	Base de données multi-échelles	283
C.3.4.	Modélisation et gestion de la précision de localisation dans les BD Géographiques	523
C.3.5.	Prototype de SGBD localisé	(Idem B.7.)306
C.3.6.	Placement automatique des toponymes	264
C.3.7.	Problèmes de modélisation en généralisation	747
C.3.8.	Généralisation cartographique: approche IA	828
C.3.9.	Méthodes algorithmiques pour la généralisation automatique	1000
C.4.1.	Maintenance du système de référence terrestre de l'IERS	796
C.4.2.	Détermination du géoïde	536
C.4.3.	Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence...	134
C.4.4.	Fonctionnement IGS	841
C.4.5.	Étude des mouvements tectoniques actuels par méthodes géodésiques	529
<i>non publié</i>	Amélioration du positionnement DORIS	225
<i>non publié</i>	Intégration GPS inertiel	154
<i>non publié</i>	Participation scientifique au projet américain Topex/poseidon	236
<i>non publié</i>	Géodynamique par GPS	342

Sommaire détaillé

Le bulletin dresse un bilan de la recherche menée à l'IGN en 1994. Il poursuit deux objectifs :

- informer un public aussi large que possible sur les domaines d'activité de l'IGN en matière de recherche,
- faire un compte-rendu succinct des progrès réalisés en 1994 pour informer les chercheurs qui travaillent sur des questions proches des axes de recherche de l'IGN .

Ces deux objectifs conduisent à proposer deux grandes parties :

- Un aperçu des travaux effectués en 1994. C'est la partie C du bulletin. Elle comprend des articles courts sans rappel de la problématique et du contexte. Elle présente principalement les actions pluriannuelles;
- Une présentation détaillée de quelques actions particulières et nouvelles. C'est la partie B.

Le lecteur qui souhaite approfondir un sujet dont on ne donne ici qu'un aperçu est invité à consulter les bulletins d'information de l'IGN n° 61 (bilan 1992) et n° 62 (bilan 1993) ou les publications dont les références sont à la fin de chaque article. La partie D explique comment se procurer les bulletins ou d'autres publications.

Partie B

La partie B présente certaines actions de recherche qui se distinguent pour diverses raisons : La nouveauté de l'approche ou de la méthode, des résultats spectaculaires ou un contexte favorable à un bilan. Pour 1994, sept actions ont été choisies. Elles montrent la diversité des recherches à l'IGN.

La première présentation concerne le relief. Olivier Jamet y développe le principe d'une nouvelle méthode d'extraction de thalwegs sur un modèle numérique de terrain (MNT).

Dans le domaine de la photogrammétrie, Patrick Julien présente une méthode de fabrication de MNT, qui renouvelle la corrélation automatique d'un couple stéréoscopique de photos aériennes.

Le second article d'Olivier Jamet traite d'une méthode de détection des bâtiments sur photos qui combine la corrélation et la reconnaissance de forme.

Marc Pierrot Deseilligny fait le point sur la lecture automatique de cartes scannées, sur les résultats et sur les perspectives de cette méthode d'acquisition.

En instrumentation, Olivier Bock dresse le bilan de la télémétrie laser aéroportée à champ large dont il termine la mise au point d'un prototype.

Dans le domaine de la cartographie automatique, et plus particulièrement en généralisation, Corinne Plazanet présente un nouvel axe de recherche sur des modèles élaborés qui révèlent les aspects de la géométrie pertinents pour le lecteur et le concepteur de cartes.

Enfin Laurent Raynal fait le point sur le prototype de système de gestion de base de données localisées utilisant la technologie "orienté-objet" : GéO₂.

Partie C

Cette partie dresse un bilan exhaustif mais succinct des actions de recherches de l'IGN.

Les comptes rendus ont été répartis en quatre grands chapitres. Chaque chapitre correspond à un laboratoire ou un groupe du CST. Le premier groupe image et photogrammétrie (ou laboratoire MATIS) est le plus important. Il a été divisé selon 6 thèmes.

B.1. Extraction du réseau des thalwegs sur un MNT*

*(Modèle Numérique de Terrain)

par *Olivier JAMET*

Introduction

Les travaux présentés ici ont débuté en 1993. Suite à une étude sur l'évaluation de la cohérence entre la Base de Données Altimétrique (BD Alti) et l'hydrographie linéaire de la Base de Données Cartographique (BD Carto), au cours de laquelle une méthode d'extraction du réseau des thalwegs sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) avait été proposée par Hervé Le Men [LE ROUX 92], nous avons eu l'opportunité d'accueillir, en collaboration avec le laboratoire du Professeur Chorowicz de l'Université de Paris VI, un stage sur la modélisation des crues dramatiques de l'Ouvèze de septembre 1991 [LE ROUX 93]. Cette nouvelle étude nous a tout naturellement, quoiqu'un peu en marge du programme de recherche, incités à compléter les travaux précédents sur l'extraction des thalwegs.

La poursuite de cette recherche en 1994 relève d'un tout autre cadre. D'une part, la production des courbes de niveau de la Base de Données Topographique (BD Topo) à l'aide de techniques de corrélation automatique fait intervenir des algorithmes de lissage de MNT dont les résultats sont améliorés par la prise en compte de lignes caractéristiques du terrain, telles les crêtes et les thalwegs. D'autre part, dans le cadre d'une étude concernant l'exploitation de la BD Alti, Daniel Piquet-Pellorce a souhaité tester l'apport de détections des crêtes et des thalwegs pour la fabrication des MNT à partir de courbes de niveau, ce qui nous a conduit à une remise en forme des algorithmes pour les rendre utilisables sur le matériel de la BD Alti.

En tant qu'outils de détection de thalwegs, les méthodes développées supposent la connaissance du relief du sol, et sont donc applicables plus particulièrement sur des MNT issus de courbes de niveau, ou sur des données à petite échelle. Leur utilisation à grande échelle sur des MNT issus de corrélation automatique ne se justifie que pour en rechercher des éléments linéaires caractéristiques, mais les problèmes liés à la présence de sur-sol dans le MNT ne sont en aucun cas gérés.

Cet article ne vise pas à exposer de manière complète le détail des algorithmes mis au point. Nous nous limiterons à une présentation qualitative de la méthode d'extraction des thalwegs mise au point, en expliquant les caractéristiques principales. Une publication plus technique sera faite dans le courant de l'année 1995.

Contexte scientifique

L'extraction du réseau des thalwegs sur un MNT n'est pas un problème nouveau. De nombreux laboratoires de recherche ont déjà publié sur le sujet, et plusieurs logiciels commerciaux offrent cette fonctionnalité. On peut donc de droit s'interroger sur l'intérêt d'aborder à nouveau cette question...

La littérature scientifique offre actuellement trois grandes familles de méthodes. La première repose sur l'extraction locale de points de forte courbure sur la surface que représente le MNT : nous ne discuterons pas cette classe de méthode, qui présente en pratique une grande difficulté de mise en oeuvre (à la fois pour seuiliser les détections, et pour les chaîner afin de constituer un réseau).

La seconde famille de méthodes propose une détection de points de départ, puis un calcul du chemin suivi par un écoulement issu de chaque point dans le MNT ([RIAZANOFF 92] par exemple).

La troisième classe de méthode procède par un calcul d'écoulement sur l'ensemble de la surface représentée par le MNT. Le principe général est assez simple: on "dépose" une quantité d'eau en chaque point de la surface, puis on

calcule l'écoulement de l'ensemble des quantités d'eau, en conservant en chaque point un accumulateur du volume d'eau l'ayant traversé : les thalwegs sont les points sur lesquels une quantité importante d'eau est passée. La méthode développée par H.Le Men procède de ce principe [LE ROUX 93].

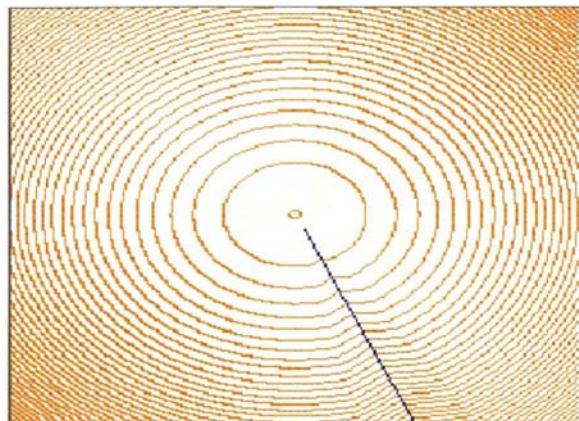


figure B.1.1
Surface synthétique pour l'évaluation des méthodes d'extraction de thalwegs (calotte sphérique)

Les techniques d'écoulement sont confrontées à deux types de difficultés. D'une part, le calcul de l'écoulement est influencé par la maille du MNT. Si l'on suppose que chaque point ne peut se déverser que sur ses voisins immédiats, l'écoulement ne se produira que rarement suivant la plus grande pente, mais dans l'une des huit directions de la maille.

Par ailleurs, même si l'on suppose que l'on connaît en chaque point la valeur exacte du volume d'eau l'ayant traversé, reste le problème du seuillage. Cette valeur n'a en effet pas de sens en elle-même: sur une surface plane inclinée, par exemple, la valeur de ce volume d'eau est directement fonction de la longueur du plan, et peut donc être aussi élevée que dans un thalweg.

Ces défauts peuvent être facilement mis en évidence sur des surfaces très lisses. Nous présentons ici l'exemple d'une calotte sphérique sur laquelle a été entaillée une légère échancreuse (fig. B.1.1. : le thalweg théorique est matérialisé en bleu sur les courbes de niveau de la surface).

La figure B.1.2. montre à gauche le résultat obtenu par une méthode d'écoulement à la plus grande pente locale, en seuillant les thalwegs sur le critère du volume d'eau passé en chaque point. On constate les deux défauts décrits précédemment. Outre le thalweg effectivement présent sur la surface (marqué d'un point vert), de nombreux artefacts ont été détectés, orientés suivant les directions préférentielles du maillage. Ce phénomène traduit également les faiblesses du seuillage : on a conservé les points par lesquels est passé plus de 180 fois le volume d'eau reçu initialement par chaque point sans se préoccuper de la concavité de la surface en ces points.

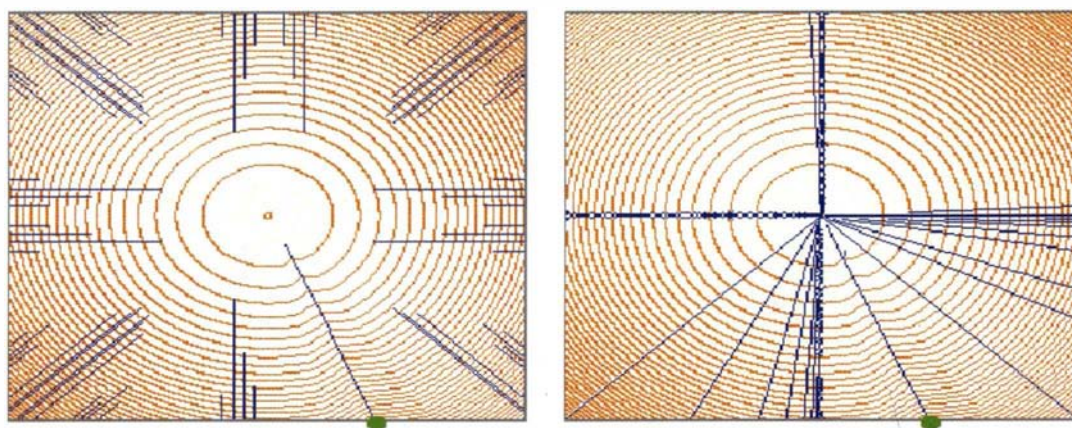


figure B.1.2.
Détection de thalwegs sur une sphère
à gauche : écoulement à la plus grande pente locale
à droite : algorithme de Riazanoff

L'écoulement issu de points de départ proposé par S. Riazanoff [RIAZANOFF 92] tentait d'apporter une solution à la discrétisation des directions dans la maille du MNT. Le cheminement le long d'une ligne de plus grande pente issue d'un point lui permet de prendre en compte la pente réelle (en mémorisant le décalage entre les positions discrètes imposées par le maillage et les positions réelles calculées pas à pas). Sa technique est efficace sur ce plan là: la figure B.1.2. montre, à droite, que les lignes trouvées suivent effectivement les plus grandes pentes. La faiblesse de la méthode réside dans la détection des points de départ, qui tient lieu de seul seuillage: ici le sommet de la sphère, quasi plat, a été identifié à un col potentiel, et l'ambiguïté de la direction de l'écoulement à partir de ce point a donné lieu à de multiples détections erronées.

D'autres alternatives ont été proposées. On peut en retenir deux qui méritent l'attention. La première reprend une technique d'écoulement sur l'ensemble de la surface, à la plus grande pente locale, mais en ajoutant une composante aléatoire dans le choix de la direction locale [FAIRFIELD 91], permettant ainsi d'éviter les systématismes constatés sur la figure B.1.2. Cette technique ne résout cependant pas le problème du seuillage de manière satisfaisante. La seconde consiste à déverser l'eau de chaque point dans l'ensemble des voisins situés à une altitude plus basse. Cette dernière approche produit un étalement de l'écoulement qui "absorbe" les effets de la discrétisation. Elle a été proposée par plusieurs auteurs, sur cette même justification très empirique [FREEMAN 91], [RIEGER 92]. Elle correspond en fait à la modélisation d'un régime permanent; on trouvera des précisions dans [QUINN 90], qui l'emploie pour l'évaluation de surfaces de drainage.

C'est cette dernière approche qui nous a paru la plus intéressante, dans la mesure où elle semblait la plus adaptée au traitement des surfaces régulières (telle la sphère de la figure B.1.1.) sur lesquelles sont observés les artefacts les plus criants.

Principe de la méthode utilisée

Modélisation de l'écoulement

Pour plus de simplicité, nous exposons le modèle d'écoulement en 4-connexité (en ne considérant pour chaque point que les quatre voisins dans les directions du maillage). Une approche équivalente peut être faite avec huit voisins. Nous représentons dans la suite les vecteurs en caractères gras majuscules, leur norme par une majuscule simple, et les scalaires par des minuscules. Le raisonnement est fait dans le plan horizontal, les grandeurs vectorielles étant toutes assimilées à leur projection sur ce plan.

On considère le MNT comme une surface découpée en cellules carrées de surface Δs (une cellule correspond à un pixel). Sur chaque cellule, la surface est assimilée à un plan, de vecteur de pente P (figure B.1.3.). L'écoulement modélisé est le régime permanent correspondant à une pluie continue de débit d_p par unité de surface.

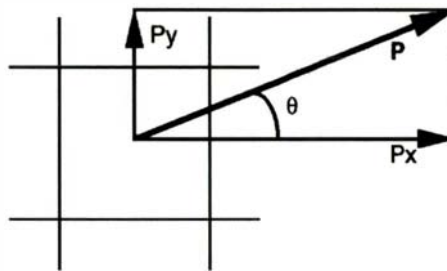


figure B.1.3.

L'équation aux débits est posée pour une cellule en formulant l'égalité entre débits entrant et sortant :

- soit h , la hauteur d'eau au point considéré
- soit \vec{V} , le vecteur vitesse de l'écoulement en sortie de ce point (\vec{V} colinéaire à \vec{P})
- soit c la longueur du côté d'une cellule ($\Delta s = c^2$)
- soient \vec{I} et \vec{J} les vecteurs unitaires du repère d'axes colinéaires aux côtés des cellules;

le débit d_s sortant de la cellule est la somme des débits sortant par deux des sections de la cellule (fig. B.1.3.) :

$$c \cdot h \cdot \vec{V} \cdot \vec{I} = c \cdot h \cdot V \cdot \cos(\theta) : \text{débit sortant dans la direction de l'axe } \vec{I} \text{ du repère,}$$

$$c \cdot h \cdot \vec{V} \cdot \vec{J} = c \cdot h \cdot V \cdot \sin(\theta) : \text{débit sortant dans la direction de l'axe } \vec{J} \text{ du repère.}$$

(en désignant par \cdot le produit scalaire)

le débit entrant d_e dans la cellule est la somme des débits sortants des cellules de l'amont et de la pluie, de débit ($d_p \Delta s$).

La formulation obtenue de l'équation ($d_e = d_s$) n'a rien de très nouveau. Elle fait simplement comprendre que (suivant ce modèle), la quantité d'eau qui passe en chaque point par unité de temps, ou débit d , est égale à :

$$d = d_e = d_s = c \cdot h \cdot V (\cos(\theta) + \sin(\theta)) \quad (1)$$

et dépend donc de la direction de la pente!

La grandeur physique qui caractérise le point (indépendamment de l'orientation) est le produit $c \cdot h \cdot V$, ou mieux, la quantité $h \cdot V$ qui n'est autre qu'un débit par unité de longueur (entendez : par unité de longueur orthogonale à la pente).

Au niveau du calcul, une programmation du modèle sous forme d'écoulement (du haut vers le bas) revient schématiquement à initialiser le point le plus haut à un débit entrant égal au débit de la pluie, puis :

- à calculer les débits sortant par chacune de ses sections,
- à en déduire les débits entrant dans les cellules en aval,
- et à recommencer ces deux dernières opérations, dans l'ordre amont-aval, jusqu'à la sortie du MNT.

Le traitement d'une cellule se résume simplement, l'équation (1) permettant de calculer le produit $c \cdot h \cdot V$:

$$c \cdot h \cdot V = d_e / (\cos(\theta) + \sin(\theta)) = (P \cdot d_e) / (p_x + p_y) \quad (2)$$

Le débit sortant dans la direction de \vec{I} devient alors : $c \cdot h \cdot V \cdot \cos(\theta) = c \cdot h \cdot V \cdot p_x / P = d_e \cdot p_x / \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$

De même, le débit sortant dans la direction de \vec{J} : $c \cdot h \cdot V \cdot \sin(\theta) = c \cdot h \cdot V \cdot p_y / P = d_e \cdot p_y / \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$

Durant l'écoulement, le calcul de la quantité $(h \cdot V)$ n'est donc pas nécessaire : les débits se transmettent aux voisins au prorata des pentes. Le résultat conservé en chaque point est alors le débit total, qu'il convient de "normaliser" a posteriori (en le divisant par $(\cos(\theta) + \sin(\theta))$) pour en dériver une grandeur indépendante de l'orientation. Cette grandeur, que nous avons appelé plus haut "débit par unité de longueur", peut à juste titre porter le nom plus classique de "surface de drainage", puisqu'elle n'est autre, en donnant la valeur unité au débit de pluie, que l'aire de la surface amont à une longueur unitaire de courbe de niveau au point considéré.

Cette modélisation n'est pas sans inconvénients. D'une part, les algorithmes à mettre en oeuvre sont assez lourds puisqu'il faut ordonner l'ensemble des pixels du MNT pour pouvoir calculer la propagation. Les temps de calcul restent toutefois très raisonnables : pour des MNT de dimension moyenne (jusqu'à environ deux millions de points), les temps de calcul ne dépassent pas quelques minutes sur une station de travail courante. D'autre part, elle occasionne une diffusion de l'écoulement, qui a peut-être des incidences sur la précision de localisation des thalwegs (nous n'avons pas encore évalué ce dernier point).

Elle présente cependant l'avantage de très bien se comporter sur des surfaces lisses: les tests que nous avons effectués sur des plans, des cônes et des sphères donnent des évaluations des surfaces drainées proches de leurs valeurs théoriques: sur le cône, l'erreur moyenne quadratique est inférieure à 0.4% de la valeur de la surface de drainage, l'écart maximum restant inférieur à 3 % sur des distances de propagation dépassant 700 pixels (la formulation proposée par Freeman [FREEMAN 91] donne, dans les mêmes conditions, des erreurs pouvant dépasser 8.5%). Sur des distances de propagation plus courtes (de l'ordre de 100 pixels), l'erreur maximale de dépasse pas le demi pixel.

Seuillage des détections

Le caractère de régularité (qualitativement parlant) des surfaces de drainage obtenues permet d'envisager un critère de sélection des thalwegs plus satisfaisant qu'un seuillage sur les valeurs de surface de drainage. Pour revenir à une définition morphologique du thalweg (et indépendante de l'échelle, ce qui n'est pas le cas des surfaces de drainage), nous proposons d'utiliser la variation de la surface de drainage par unité de longueur le long de la pente, qui traduit la convexité locale du MNT : sur une surface plane, cette variation est égale à 1.0. Elle est inférieure si la surface est concave, et supérieure si la surface est convexe. Ce critère rejoint les méthodes de recherche des convexités du MNT par des opérateurs locaux, avec l'énorme avantage que le critère de convexité que l'on calcule ici ne dépend pas seulement d'un voisinage du point, mais intègre une information sur la forme de tout le bassin-versant.

En pratique, cette "dérivée" de la surface de drainage n'est pas exempte de bruit, ne serait-ce qu'à cause des caractères cumulatif et diffusant de la méthode. Le problème est particulièrement sensible aux abords des thalwegs, où toutes les surfaces de drainage ont des valeurs relativement élevées. Pour remédier à ces difficultés, nous utilisons actuellement une pseudo-dérivée de la surface de drainage, définie comme la différence entre la valeur de la surface au point considéré et sa valeur au point affluent de plus forte surface de drainage. Nous avons de plus choisi un critère intégrant cette information sur une certaine longueur : un thalweg est sélectionné si un nombre de points suffisant (que nous appelons "longueur minimale") présente une dérivée de la surface de drainage supérieure à un seuil fixé (définissant la convexité minimale). L'expérience montre que l'on peut employer sans danger d'artefact des longueurs minimales de quelques pixels, et des seuils de convexité proches de 1,0 (voir le paragraphe suivant).

Avantages de la méthode

Comportement sur les surfaces régulières

La modélisation employée et la méthode choisie pour le seuillage garantissent l'absence d'artefacts sur des surfaces régulières. Des tests ont été effectués sur des plans de grande dimension (jusqu'à 1 000 pixels de côté) : en gardant une valeur de longueur minimale proportionnelle à la taille du plan (inférieure à 5% de la longueur suivant la plus grande pente), aucune détection n'est effectuée pour un seuil de 1,0 sur l'indicateur de convexité (1,0 étant la valeur théorique). Autrement dit, on pourrait, sur des MNT "parfaits", détecter des thalwegs de longueur égale à 5% de la longueur du plus long chemin (suivant la plus grande pente) situé sur une surface parfaitement lisse sans courir le risque d'artefacts. En pratique, il n'y a pas de MNT parfait, et la longueur minimale doit toujours être supérieure à plusieurs pixels (4 à 6 — voir l'exemple au § suivant).

A titre d'illustration, on peut se reporter à la figure B.1.1., qui est en fait le résultat d'une détection automatique.

Exhaustivité de la détection

Le filtrage efficace des artefacts sur les surfaces régulières (qui sont les seules à poser des problèmes vis à vis des directions du maillage) permet une exploitation poussée de l'information contenue dans le MNT. Comme nous l'avons dit au paragraphe précédent, des thalwegs d'une longueur de quelques pixels sont détectables, même au voisinage des crêtes (i.e. pour des surfaces de drainage très faibles). La figure B.1.4. montre le résultat d'une détection, sans condition imposée sur les valeurs des surfaces de drainage (MNT BD Alti au pas de 40 m, Mont Ventoux, zone d'environ trente kilomètres de côté). Certes, ce résultat n'a pas subi de contrôle exhaustif, et nous ne pouvons garantir qu'aucun artefact n'est présent. Un contrôle visuel a toutefois été effectué sur une cinquantaine de drains douteux a priori, à l'aide d'outils de visualisation de coupes et de calcul d'estompage: nous avons vérifié à chaque fois la présence sur le MNT d'une concavité justifiant la détection.

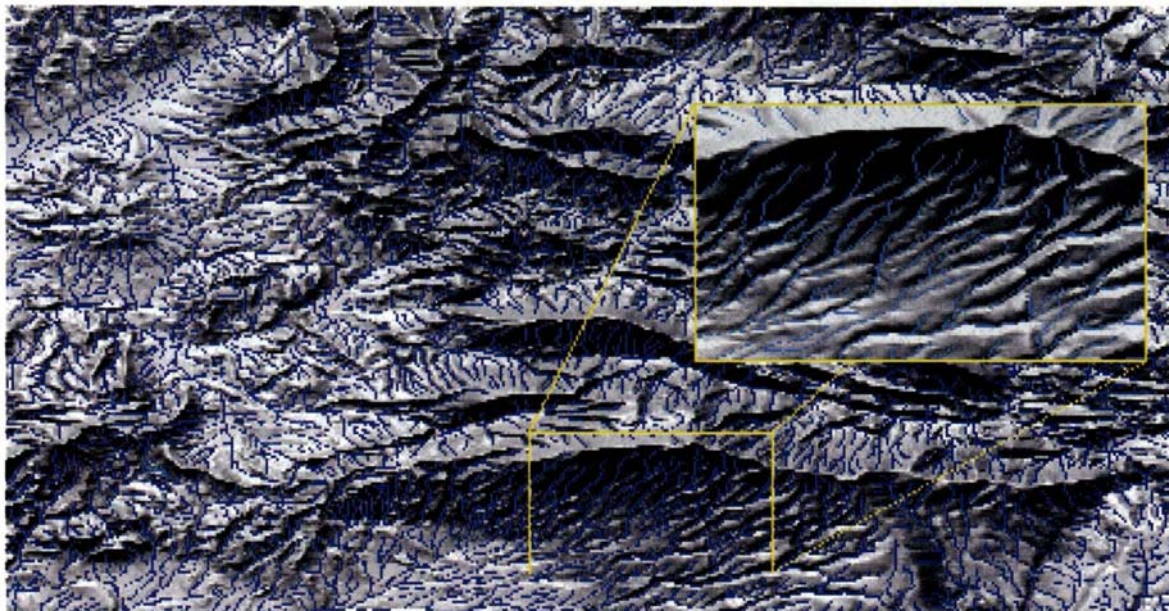


figure B.1.4.
*Sélection des thalwegs sur un MNT BD Alti sur le seul critère de convexité (Mont Ventoux; pas de 40 m)
(l'encart est représenté au 1 : 200 000)*

Ce résultat doit cependant être pris avec précautions, quant à sa valeur applicative : même en cas de détection parfaite (ce que, malgré la qualité apparente des résultats, nous ne saurions garantir absolument), l'illustration précédente effectue une sélection largement au delà de ce que devrait autoriser la qualité du MNT lui-même; autrement dit, si l'algorithme n'introduit pas d'artefacts, il détecte ceux du MNT. Dans la zone choisie, le contexte est plutôt favorable (zone montagneuse à fortes pentes). En zone de plaine, la position des drains n'aura plus de sens (indétermination du MNT), et l'on retrouvera des drains sur tous les défauts de la surface.

Indépendance à la rotation

Sans aller jusqu'à une détection abusivement exhaustive, l'intérêt principal de la méthode est l'indépendance relative qu'elle offre vis à vis de la direction du maillage : le réseau de thalwegs obtenu est pratiquement invariant par rotation. La figure B.1.5. reprend un extrait du site présenté au paragraphe précédent. Afin de comparer deux détections pour deux directions de maillage différentes, nous avons sélectionné une empreinte circulaire (en bordant le reste de l'image par un cône).

La figure B.1.6. montre la superposition de deux détections effectuées l'une sur le MNT d'origine, l'autre sur le MNT après rotation de 26 degrés (par ré-échantillonnage bilinéaire), ceci dans le cas d'un algorithme d'écoulement à la plus grande pente locale (à gauche), et dans le cas de l'algorithme proposé (à droite).

L'indépendance à la rotation n'est bien entendu pas parfaite, sans doute en partie à cause de la qualité du ré-échantillonnage (l'emq entre le MNT initial et le MNT obtenu par rotation inverse du MNT tourné est d'environ neuf pas de quantification — soit presque un mètre), comme probablement à cause des imperfections résiduelles du calcul (les résultats sur les pentes faibles restent bruités). Toutefois, une nette amélioration peut-être observée par rapport à la détection par l'algorithme des plus grandes pentes locales.

Dans cet exemple, on a conservé uniquement les points de surface de drainage supérieure à cinquante pixels, et les thalwegs de longueur supérieure à six pixels. Ce seuillage est assez largement en dessous des valeurs préconisées pour l'algorithme des plus grandes pentes locales (pour lequel on se limite généralement aux points de surface drainée supérieure à 180 ou 200 pixels) : avec une exhaustivité moins grande, l'algorithme des plus grandes pentes locales présenterait les mêmes propriétés d'invariance à la rotation *sur ce type de relief*. L'intérêt de la méthode proposée réside dans le fait qu'à fiabilité égale, on peut pousser plus loin la détection.

Conclusion

L'apport de cette recherche, tant sur la modélisation de l'écoulement qui conduit à une formulation indépendante de la rotation, que sur la technique de seuillage qui permet une sélection fiable et indépendante de l'échelle, peut intéresser de nombreuses applications.

Au niveau de l'IGN, la première concerne bien entendu l'extraction de lignes caractéristiques sur les MNT. C'est l'utilisation qui en est faite actuellement au laboratoire MATIS, dans le cadre des recherches pour l'aide à la restitution de la BDTopo. Le bon comportement de la détection sur des surfaces régulières permet sa mise en oeuvre sur des MNT issus de corrélation automatique à haute résolution, puis lissés par un filtre passe bas : on peut ainsi choisir le niveau de détails de la détection par le simple "changement d'échelle du MNT" qu'opère le lissage utilisé (fig. B.1.7.). Ajoutons que l'on peut associer assez simplement un réseau de crêtes au réseau de thalwegs détecté [RIEGER 92] (fig. B.1.7.): ces éléments permettront d'améliorer le rendu cartographique des courbes de niveau calculées sur les MNT issus de corrélation [BEAUVILLAIN 94]. Les logiciels sont également utilisés en tant que détecteurs de lignes caractéristiques au laboratoire COGIT, dans le cadre d'une recherche concernant la généralisation de l'orographie.

Dans le même ordre d'idée, l'absence d'artefacts sur des surfaces planes fait de la méthode un bon outil pour le traitement de MNT issus de procédés de triangulation (fig. B.1.8.). Une étude est prévue en 1995 au laboratoire MATIS pour évaluer l'apport d'un réseau de crêtes dérivé du réseau des thalwegs pour le calcul d'estompages à partir de MNT issus de l'interpolation des courbes de niveau de la BDTopo par le logiciel TOPMNT.

La robustesse de la détection pourrait par ailleurs donner un nouvel intérêt à ce type de méthode pour la cartographie de l'hydrographie linéaire. Une telle application pose un problème de sélection des drains correspondant à des cours d'eau, qui ne peut a priori se résoudre uniquement par l'automatisme. Les logiciels pourraient toutefois constituer une aide à la saisie de la géométrie du réseau. Il conviendra au préalable d'évaluer d'une part les caractéristiques adéquates des MNT (résolution, lissage...) pour une saisie à une échelle donnée, et d'autre part, la précision réelle du détecteur (en particulier pour ce qui concerne la géométrie). Il faut par ailleurs émettre une restriction à cet usage: ce type de méthode est notoirement inefficace en zone de faible relief.

Enfin, la sensibilité du détecteur peut en faire un outil intéressant pour l'évaluation de la qualité des MNT, en particulier en tant que détecteur d'artefacts d'interpolation dans le procédé de la BD Alti : tout défaut d'interpolation donnant lieu à un creusement local du MNT sera détecté comme un thalweg, et pourrait être mis en évidence sur des caractéristiques géométriques simples.

Publications

- [BEAUVILLAIN 94] E.Beauvillain & O.Jamet : *Évaluation de la qualité d'un MNT issu de corrélation automatique de photographies aériennes*, Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 137, (Actes du colloque SFPT/RSS "Qualité de l'Interprétation des Images de Télédétection pour la Cartographie", Grignon (F), septembre 1994, à paraître.
- [LE ROUX 92] D. Le Roux : *Contrôle de la cohérence d'un réseau hydrographique avec un Modèle Numérique de Terrain*, rapport de stage, IGN, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, septembre 1992.
- [LE ROUX 93] D. Le Roux : *Modélisation des Écoulements sur un Modèle Numérique de Terrain*, rapport de stage, IGN, Service de la Recherche, Laboratoire MATIS, juillet 1993.

Références

- [FAIRFIELD 91] J.Fairfield & P.Leymarie : *Drainage Network from Grid Digital Elevation Models*, Water Resources Research, vol.27, No 5, mai 1991, pp. 709-717.
- [FREEMAN 91] T.G.Freeman : *Calculating Catchment Area with Divergent Flow Based on Regular Grid*, Computer & Geosciences, vol.17, n° 3, pp. 413-422, 1991.
- [QUINN 91] P.Quinn, K.Beven, P.Chevallier & O.Planchon : *The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modelling using Digital Terrain Models*, Hydrological Processes, vol 5, pp. 59-79, 1991.
- [RIAZANOFF 92] S.Riazanoff, P.Julien, B.Cervelle & J.Chorowicz : *Extraction et analyse automatiques d'un réseau hiérarchisé de thalwegs. Application à un modèle numérique de terrain dérivé d'un couple stéréoscopique SPOT*, Int. J. Remote Sensing, vol.13, n° 2, pp. 337-364, 1992.
- [RIEGER 92] W.Rieger : *Automated River Line and Catchment Area Extraction from DEM Data*, ISPRS Commission IV, Washington (USA), août 1992.



figure B.1.5.

Zone test pour l'évaluation de l'invariance à la rotation
(site de la figure B.1.4., quart Nord Ouest)

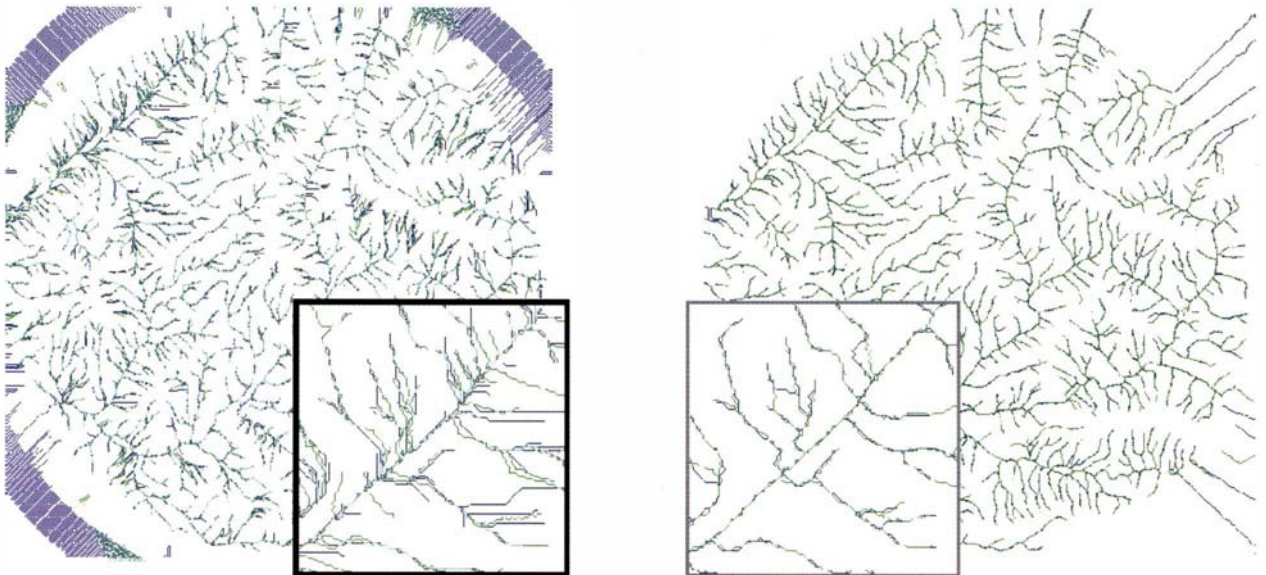


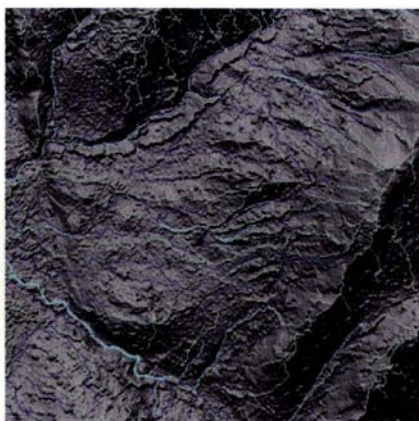
figure B.1.6.

test d'invariance à la rotation :

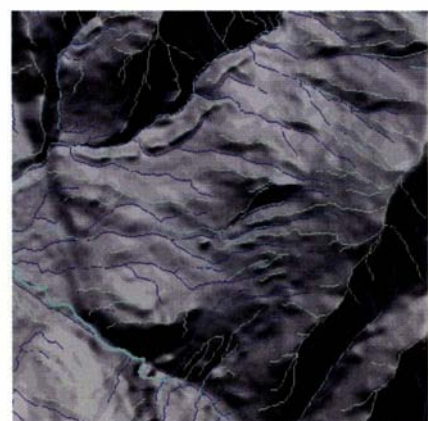
(en bleu, les thalwegs extraits sur le MNT initial; en vert, les thalwegs extraits sur le MNT obtenu par rotation du MNT initial de 26 degrés).

à gauche: réseaux obtenus par un algorithme d'écoulement à la plus grande pente locale (on remarque les écoulements multiples sur les parois du cône bordant la zone),

à droite: réseaux obtenus par la méthode proposée (l'encart représente le grossissement d'un détail au Nord-Ouest de la zone).



Détection sur une corrélation "brute"



Détection sur une corrélation lissée

figure B.1.7.

Extraction sur un MNT issu de corrélation automatique à haute résolution (7.5 m).

En bleu : réseau de thalwegs, en vert : réseau de crêtes associé, en cyan : hydrographie de la BDTopo.
(Région d'Albertville, zone 3 x 3 km, échelle 1 : 50 000)

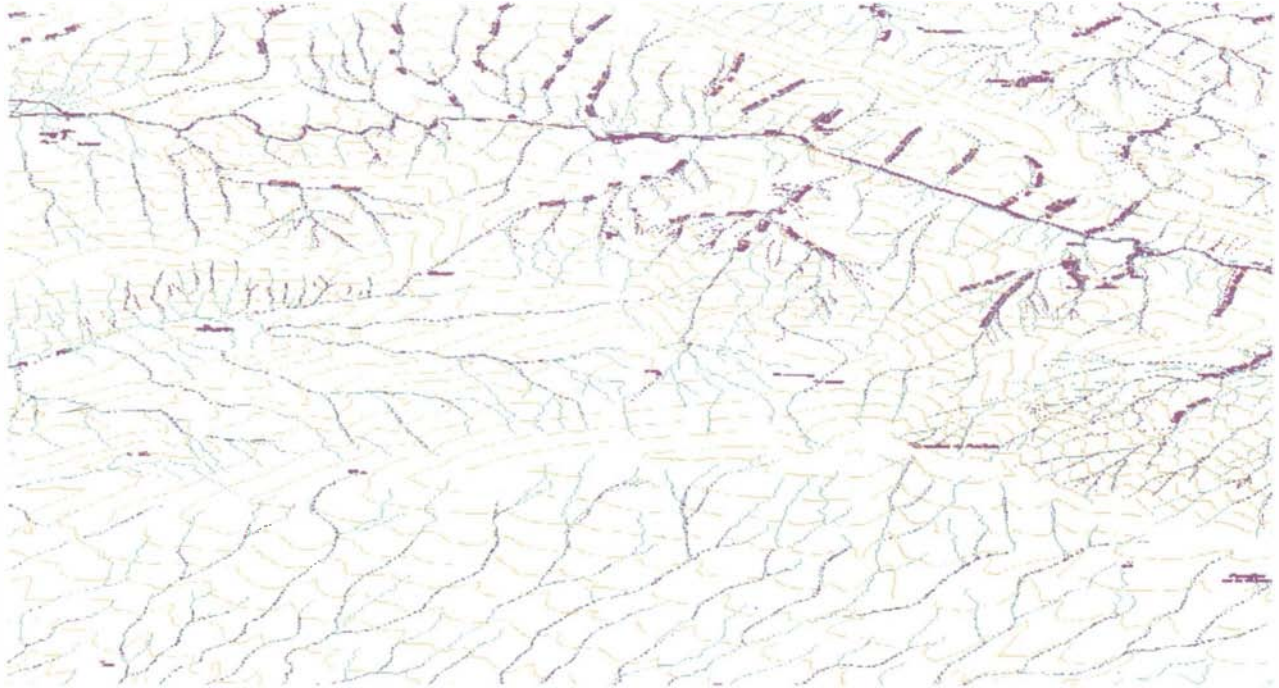


figure B.1.8.

*Détection automatique du réseau des thalwegs
en superposition à la planche d'hydrographie de la carte au 1 : 25 000
(extrait de la feuille 3140ET : Mont Ventoux; échelle de la reproduction: 1 : 50 000)*

La détection (cyan) a été calculée sur un MNT au pas de 12,5 m, issu d'une triangulation des courbes de niveau de la BDTopo par le logiciel TOPMNT. Les courbes de niveau représentées (orange; équidistance 10 mètres) sont calculées sur le MNT. La planche d'hydrographie de la carte (magenta) a été numérisée au département MERCATOR de l'IGN (F. Lantoine), puis ré-échantillonnée à 400 microns pour cette reproduction.

B.2 Corrélation par facettes de terrain

par Patrick JULIEN

On se propose d'expliquer dans cet article le principe de la "corrélation par facettes", telle qu'elle est mise en oeuvre dans un programme prototype en cours de développement au laboratoire MATIS. Pour saisir l'intérêt de ce nouveau corrélateur, il est utile de rappeler d'abord comment fonctionne le corrélateur utilisé précédemment.

Principe du corrélateur précédent ou "corrélateur ponctuel"

On dispose d'un couple stéréoscopique de photographies (numériques) d'un terrain, dont on connaît les positions dans l'espace, et on cherche l'altitude des points de ce terrain .

Pour cela, on décide d'explorer systématiquement pixel par pixel une des photographies, disons la photographie 1 (à gauche sur la figure B.2.1).

Supposons qu'on en soit arrivé au pixel a_1 . On choisit une petite portion rectangulaire V_{a1} de la photographie 1, ou *imagerie*, centrée sur a_1 .

Si on réussit à trouver dans la photographie 2 l'imagerie V_{a2} *identique* à V_{a1} , alors son centre a_2 est le point homologue de a_1 , et le détail A du terrain d'images a_1 et a_2 se trouve à l'intersection des rayons S_1a_1 et S_2a_2 (S_1, S_2 centres perspectifs) .

La difficulté est qu'il n'existe pas en pratique d'imagerie V_{a2} identique à V_{a1} ; en effet pour que deux imageries V_{a1} et V_{a2} d'une portion de terrain soient identiques, il faudrait : a) que ce terrain soit plan ; b) que les deux photographies soient coplanaires ; c) que leur plan soit parallèle au terrain ; ce n'est jamais le cas.

On doit donc se contenter de trouver, au lieu de l'imagerie identique à V_{a1} , l'imagerie V_{a2} *ressemblant le plus* à V_{a1} .

Pour chiffrer la ressemblance entre imageries, on choisit une fonction *indice de ressemblance* qui associe à toute paire d'imageries V_{a1} et V_{a2} de même taille une valeur numérique $I(V_{a1}, V_{a2})$.

Dans notre cas l'indice choisi $I(V_{a1}, V_{a2})$ est *le coefficient de corrélation linéaire* des tableaux

$$\begin{aligned} V_{a1}(c, l) &= r_1(c_1 + c, l_1 + l) & -h \leq c \leq h, & -k \leq l \leq k, & a_1 = (c_1, l_1) \\ V_{a2}(c, l) &= r_2(c_2 + c, l_2 + l) & -h \leq c \leq h, & -k \leq l \leq k, & a_2 = (c_2, l_2) \end{aligned}$$

soit

$$I(V_{a1}, V_{a2}) = \frac{\text{cov}(V_{a1}, V_{a2})}{\sigma(V_{a1}) \sigma(V_{a2})}$$

(r_1, r_2 étant les matrices décrivant les photographies entières).

On sait que le coefficient $I(V_{a1}, V_{a2})$ vaut au plus 1, et que pour deux imageries identiques $V_{a1} = V_{a2}$, il vaut 1.

Il est donc naturel d'admettre que l'imagerie V_{a2} ressemblant le plus à V_{a1} est celle pour laquelle le coefficient $I(V_{a1}, V_{a2})$ est *le plus proche possible* de 1, ou encore celle présentant la *corrélation maximale* avec V_{a1} .

On se rend compte toutefois que plus le terrain est incliné (non-parallèle aux clichés) et courbé (éloigné d'un plan), plus les imageries V_{a1}, V_{a2} entourant deux points homologues sont dissemblables.

Cela a plusieurs conséquences nuisibles.

- Plus les imquettes V_{a_1} et V_{a_2} sont grandes, plus elles sont dissemblables ; il est donc prudent de ne "corrélér" que des imquettes de petite taille , disons pour fixer les idées de 5×5 à 11×11 pixels ; le risque augmente alors d'obtenir des "faux homologues" (plus une imquette est petite, plus on a de chances de trouver une imquette qui lui ressemble).

- Même avec des imquettes petites, la corrélation maximale peut prendre une valeur très éloignée de 1, au point d'être jugée insuffisante pour que le point a_2 soit retenu comme homologue de a_1 .

- Les deux imquettes ne représentent pas tout à fait le même élément de terrain, de sorte qu'on ne sait pas exactement pas de quel détail du sol on a obtenu l'altitude.

Il est raisonnable d'admettre qu'*en moyenne*, l'altitude obtenue est celle du *point* a_1 , centre de l'imquette V_{a_1} ; c'est d'ailleurs pour cette raison que le corrélateur est qualifié de *ponctuel*.

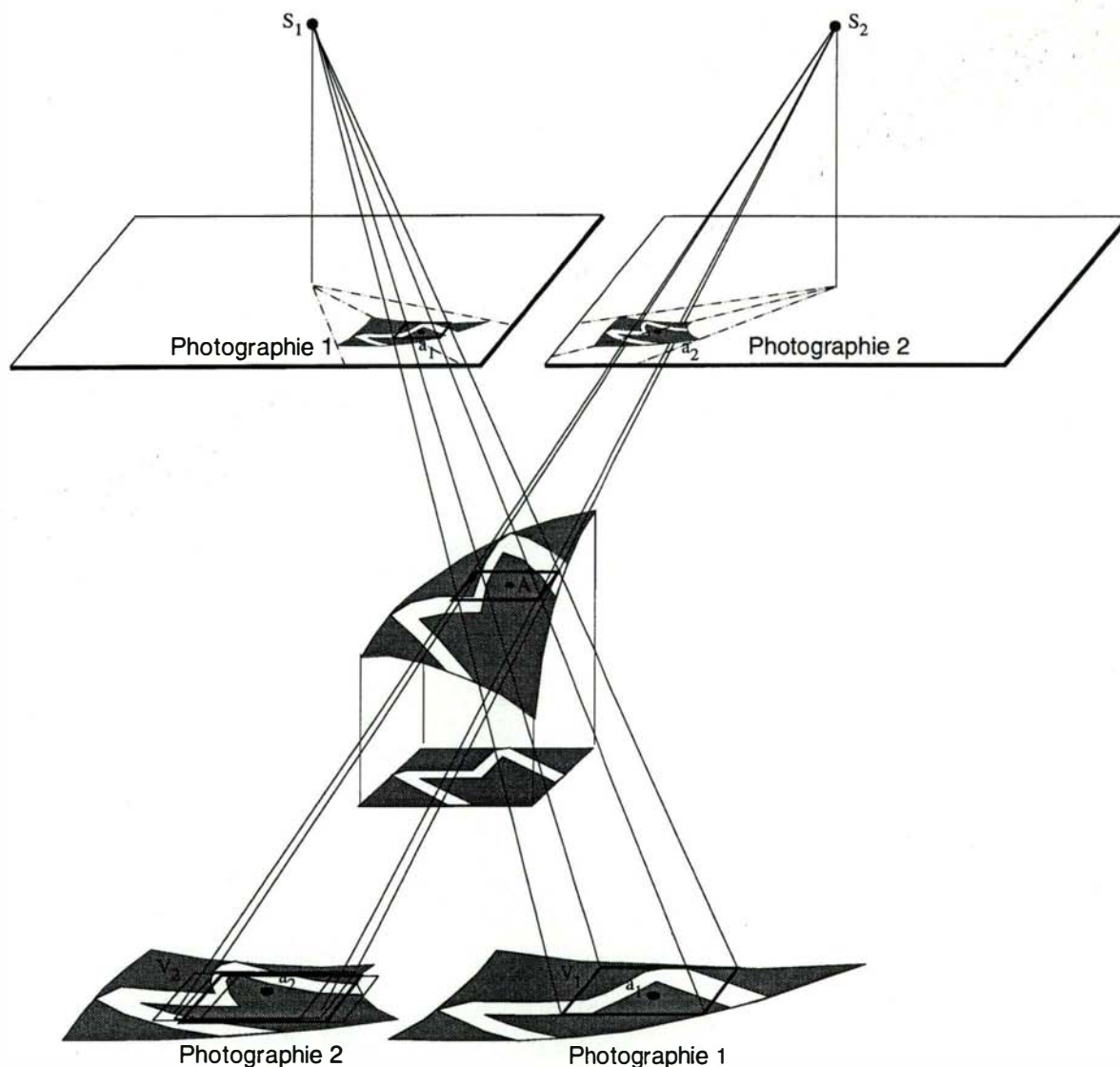


figure B.2.1

Exemple

A titre d'illustration, des photographies ont été synthétisées , avec les caractéristiques suivantes.

$$\text{Surface du "terrain" : } Z(X,Y) = 50 + 60(-x^2 + 2xy - y^2 + 2y + 1)$$

Avec : $x = (X - 600900) / 200$, $y = (Y - 198900) / 200$; x,y sont donc les coordonnées "réduites"

$$0 \leq x \leq 1 , 0 \leq y \leq 1 \text{ dans le carré}$$

$$600900 \leq X \leq 601100 , 198900 \leq Y \leq 199100$$

Dans ce carré , la surface ressemble à peu près à celle de la figure B.2.1. La texture du "terrain" est donnée par la figure B.2.2.

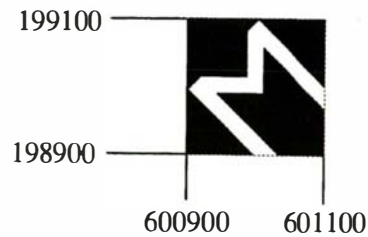


figure B.2.2

Sommet S_1 de la photographie 1 = $OS_1 = 600000 \mathbf{I} + 200000 \mathbf{J} + 3000 \mathbf{K}$
(OIJK repère orthonormé)
Sommet S_2 de la photographie 2 = $OS_2 = 602000 \mathbf{I} + 200000 \mathbf{J} + 3000 \mathbf{K}$
Axes des photographies = parallèles à \mathbf{K}
Distances principales = 0,150
Lignes des images = parallèles à S_1S_2
Dimensions des pixels = 0,0001
Tailles des images = 2001 x 2001

De façon précise le détail de coordonnées X,Y,Z est représenté dans les photographies en
colonne $c_1 = 1001 - 0,150 \times 10000 \times (X-600000)/(Z-3000)$
ligne $l_1 = 1001 + 0,150 \times 10000 \times (Y-200000)/(Z-3000)$
colonne $c_2 = 1001 - 0,150 \times 10000 \times (X-602000)/(Z-3000)$
ligne $l_2 = 1001 + 0,150 \times 10000 \times (Y-200000)/(Z-3000)$ (noter que $l_1 = l_2 = l$)

La figure B.2.3 montre les photographies de ce "terrain".

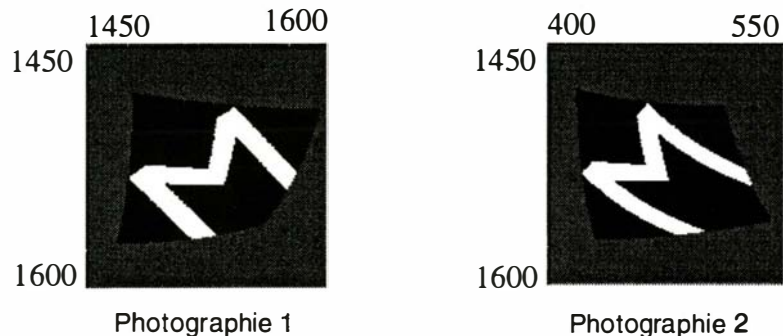


figure B.2.3

La figure B.2.4 montre :

- en haut une imagerie fixe extraite de la photographie 1, de centre $c_1=1546$, $l=1512$;
- au milieu des imageries de même taille extraites de la photographie 2, toutes centrées sur la ligne $l=1512$;
- en bas les coefficients de corrélation correspondants et la courbe qu'ils définissent.

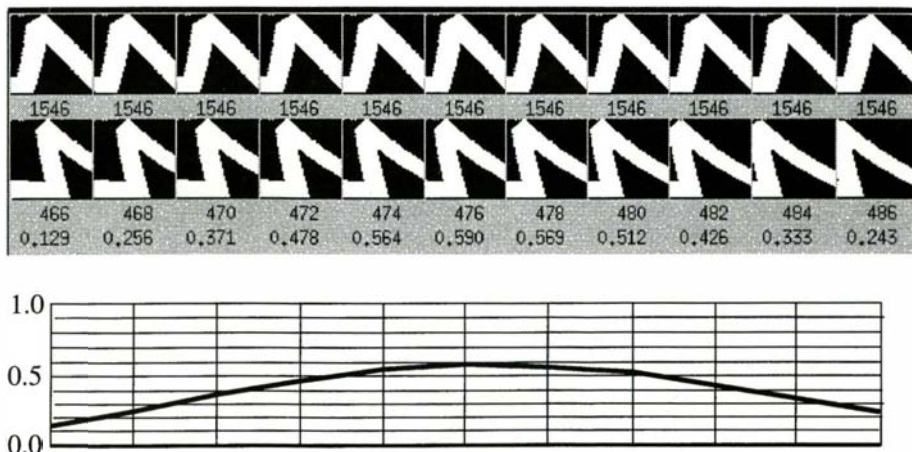


figure B.2.4

La meilleure corrélation (0.590) est obtenue pour l'imagerie de centre $c_2=476$, $l=1512$.

Le détail représenté dans les photographies en (c_1, l) et (c_2, l) a pour coordonnées :

$$X = 600000 + 2000 \times (c_1 - 1001) / (c_1 - c_2) = 601018,69$$

$$Y = 200000 - 2000 \times (l - 1001) / (c_1 - c_2) = 199044,86$$

$$Z = 3000 - 3000000 / (c_1 - c_2) = 196,26$$

(sa cote sur la surface vraie est : $Z(X,Y) = 195,89$)

Prise en compte de l'inclinaison du terrain dans le calcul de corrélation.

On voit bien sur l'exemple que, en raison du relief local, les imagettes extraites de la photographie 2 sont très déformées par rapport à l'imagette modèle extraite de la photographie 1.

Une idée naturelle est alors de chercher non seulement la position de l'imagette 2, mais aussi de chercher à la *déformer* pour la rendre identique à l'imagette 1.

On peut espérer ainsi obtenir une *forte corrélation* entre l'imagette 1 et l'imagette 2 déformée, et en même temps déduire de la déformation appliquée la *forme du terrain* dans l'imagette.

Une façon équivalente d'envisager la question est la suivante.

Au lieu de déplacer une imagette dans la photographie 1, on déplace une fenêtre rectangulaire dans le plan de la carte; pour chaque position de cette fenêtre, on cherche l'altitude et l'inclinaison du terrain situé à l'aplomb de la fenêtre, telles que les photographies projetées sur ce terrain, puis sur la carte (autrement dit les ortho-photographies) présentent une corrélation maximale : voir figure B.2.5.

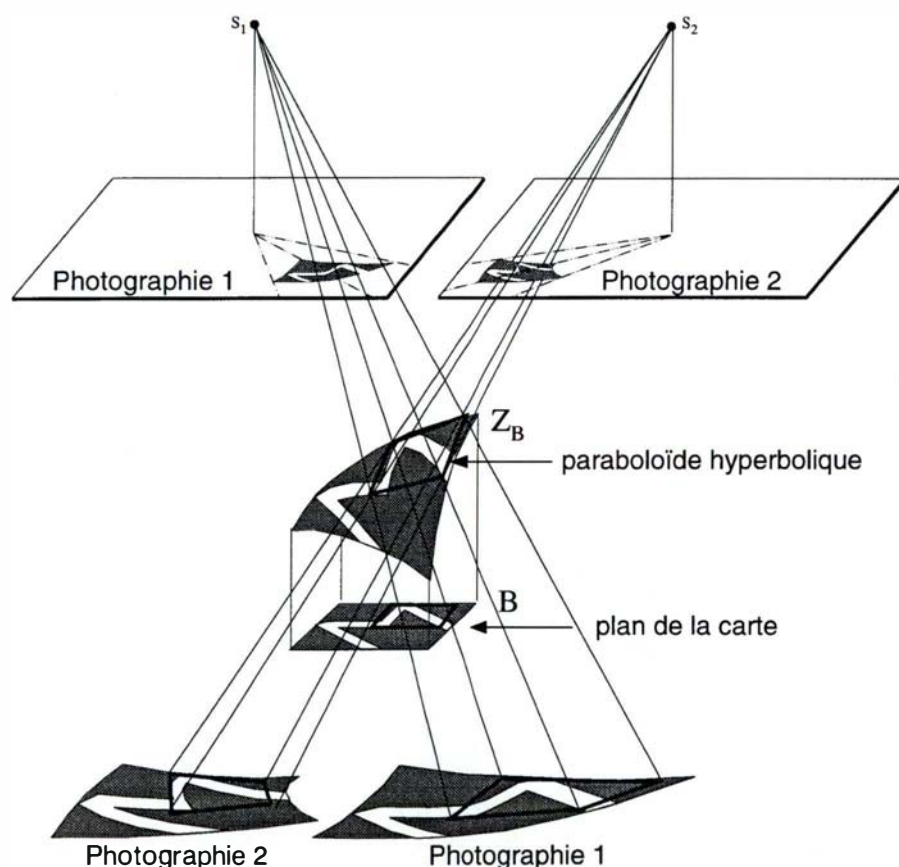


figure B.2.5

De façon précise, par altitude et inclinaison du terrain, il faut entendre une *surface mathématique* simple représentant le terrain. La surface que nous choisissons est le *parabolioïde hyperbolique*, qui est la plus simple possible après le plan.

Ce principe de corrélation permet donc de restituer le terrain par éléments juxtaposés ayant l'allure de facettes, d'où le nom abrégé de *corrélation par facettes*.

Comme les facettes ne sont qu'une approximation du terrain, les *ortho-imagettes* obtenues ne sont qu'approchées.

La figure B.2.6 montre les ortho-imagettes obtenues pour le couple de photographies de synthèse, et leurs coefficients de corrélation, lorsqu'on fait varier un des (quatre) paramètres définissant le parabolôïde hyperbolique approximant (ici la cote Z_B du point B).

On voit que ces ortho-imagettes se ressemblent beaucoup plus que les imagettes de la figure B.2.4, leur corrélation maximale valant 0,915.

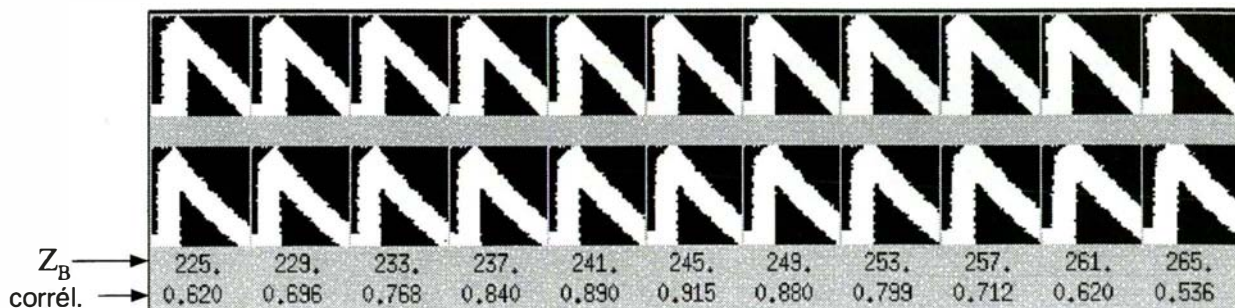


figure B.2.6

Recherche pratique de la meilleure corrélation d'une facette.

Le problème central de la corrélation par facettes est le suivant :

Trouver les altitudes Z_A, Z_B, Z_C, Z_D aux coins d'une maille carrée ABCD, de façon que le parabolôïde hyperbolique construit sur les points $(A, Z_A), (B, Z_B), (C, Z_C), (D, Z_D)$ donne des ortho-imagettes présentant la meilleure corrélation (figure B.2.7).

Dans le programme prototype développé, on obtient les altitudes Z_A, Z_B, Z_C, Z_D par tâtonnements, en les faisant varier à tour de rôle dans le sens qui augmente la corrélation, et cela aussi longtemps que la corrélation continue à croître.

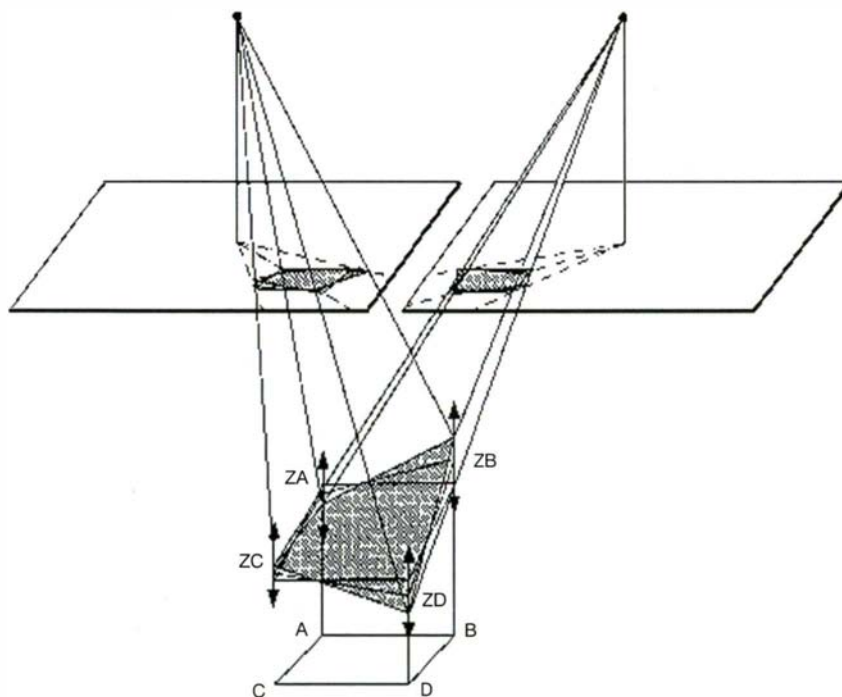


figure B.2.7

Avantages de la corrélation par facettes sur la corrélation ponctuelle.

On voit plusieurs avantages.

- Les ortho-imagettes corrélées étant ressemblantes, les coefficients de corrélation sont élevés, et deviennent donc significatifs ; il est ainsi plus facile de choisir un seuil d'acceptation.
- Les déformations dues au relief étant corrigées (au moins au premier ordre), il est possible de corréler des ortho-imagettes de grande taille ; le risque de "fausse corrélation" est alors diminué.
- Alors que la corrélation ponctuelle revient à approximer le terrain par une fonction en escalier, la corrélation par facettes approxime le terrain par une fonction "bilinéaire par morceaux" ; l'approximation est donc meilleure, même avec un pas plus grand, comme le suggère la figure B.2.8 en dimension 1.

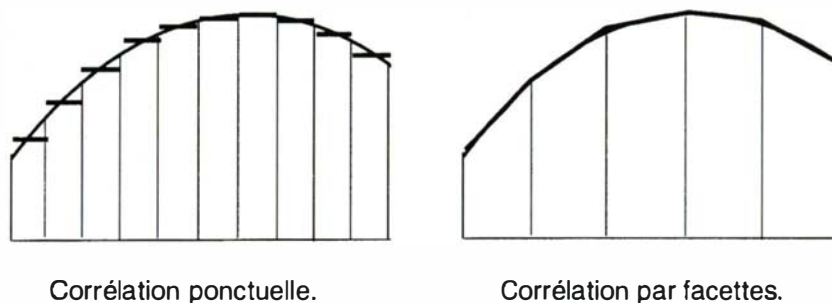


figure B.2.8

On peut noter aussi que tous les points d'une facette ont la même "qualité" ; il n'y a aucune raison de considérer par exemple le point central comme plus représentatif, comme dans la corrélation ponctuelle.

- La surface restituée est beaucoup plus caricaturée que celle issue de la corrélation ponctuelle ; les courbes de niveau dérivées de cette surface sont tout de suite lisibles, sans qu'un traitement de lissage soit nécessaire.
- Dans le programme prototype développé, les facettes sont définies directement dans la projection cartographique ; en outre les ortho-imagettes sont fabriquées directement à partir des photographies originelles (sans ré-échantillonnage en géométrie épipolaire comme en corrélation ponctuelle) ; l'utilisation est donc sensiblement simplifiée.

Conclusion.

La corrélation par facettes nous semble intéressante notamment pour restituer une planche de courbes de niveau en paysage rural.

Des essais sur un couple stéréoscopique de la région d'Albertville ont en effet montré que les courbes de niveau obtenues ont un aspect voisin de celles restituées visuellement pour la base de données BDTopo.

Toutefois même si la corrélation par facettes est sensiblement plus robuste que la corrélation ponctuelle, des essais récents sur un couple présentant de vastes plages uniformes montrent qu'on ne peut pas se dispenser totalement d'un traitement solide de validation.

Cette validation (sur le même modèle que celle de la corrélation ponctuelle) consistera à assurer la cohérence entre facettes voisines en faisant l'hypothèse d'un terrain (localement) régulier.

B.3. Interprétation et restitution automatique des bâtiments sur images aériennes

par Olivier DISSARD

Introduction : contexte et objectifs

La recherche sur la restitution automatique des bâtiments sur couple de photographies aériennes a débuté en 1991 dans le cadre d'une thèse de l'Ecole nationale supérieure des télécommunications (ENST) sous la direction d'Henri Maître, qui s'est déroulée au laboratoire MATIS. Cette thèse, financée par l'IGN, a été soutenue par Tuan Dang le 12 décembre 1994 à l'ENST.

Les travaux poursuivent une démarche développée précédemment par Luo et Maître, qui abordait le problème de l'extraction du relief par l'utilisation conjointe d'une corrélation automatique délivrant un semi dense de points homologues, et d'une segmentation délivrant un ensemble de régions pour lesquelles le relief est interpolé par des fonctions mathématiques sur les résultats de la corrélation.

Les applications de la thèse de Tuan Dang concernent la reconnaissance et la reconstruction de la classe des bâtiments isolés de forme simple (rectangle ou composition de rectangles) pour lesquels nous supposons que les toits sont plans; ses objectifs sont : la reconnaissance de ces bâtiments sur des critères géométriques, leur interprétation sous forme de région, et enfin l'application du processus de correction des disparités à l'intérieur des régions pour le calcul de leur élévation.

Cet article rend compte des développements et des tests effectués lors de cette thèse.

Axes de recherche

On distingue deux grands axes de recherche pour la restitution automatique des bâtiments:

- Le premier s'intéresse à l'extraction monoscopique des bâtiments : des critères de forme, de radiométrie et de texture permettent de reconnaître des bâtiments obéissant à des modèles simples, par segmentation ou interprétation d'une carte de contours. La reconstruction en 3-D du bâtiment se fait soit par mesure des dimensions des ombres si l'on se restreint à l'étude d'une image; soit par mise en correspondance des structures en sortie de l'analyse monoscopique des deux images d'un couple.

- Les techniques basées sur la corrélation forment un deuxième grand axe : soit on tient compte de modèles de disparité dès le processus de corrélation (facettes planes...), soit on segmente les résultats d'une corrélation fine en régions de parallaxe homogène correspondant à des modèles de bâtiment.

Ces deux grands axes possèdent leurs avantages et leurs inconvénients : pour les méthodes de reconnaissance de formes, on peut s'attendre à une bonne précision géométrique (forme du bâtiment détecté et localisation); cependant, un certain nombre de fausses détections - voire de détections aberrantes - et la propagation des erreurs de précision à chaque étape du processus sont autant de facteurs qui s'opposent à une reconstruction 3-D des bâtiments détectés, dans les tolérances que nous nous sommes fixées. Les méthodes basées sur la corrélation quant à elles se heurtent à des problèmes de multi-correspondances (faces verticales) et de non-correspondance en zone urbaine (présence de zones d'occlusion telles les ombres qui peuvent n'apparaître que sur l'une des deux images). Ainsi, même si l'on peut s'attendre à de bons résultats à l'intérieur des zones d'élévation continue, les erreurs qui se produisent à leurs frontières ne permettent pas de segmenter la carte des parallaxes en bâtiments avec la précision souhaitée en planimétrie.

La méthode qui est mise au point dans la thèse se propose d'exploiter la précision en x et en y d'une étape de reconnaissance de forme et la précision statistiquement fiable en z d'une étape de corrélation, grâce à une étape de fusion qui calcule l'élévation de chaque bâtiment détecté par des méthodes statistiques sur la carte des parallaxes.

Le processus se résume au schéma suivant :

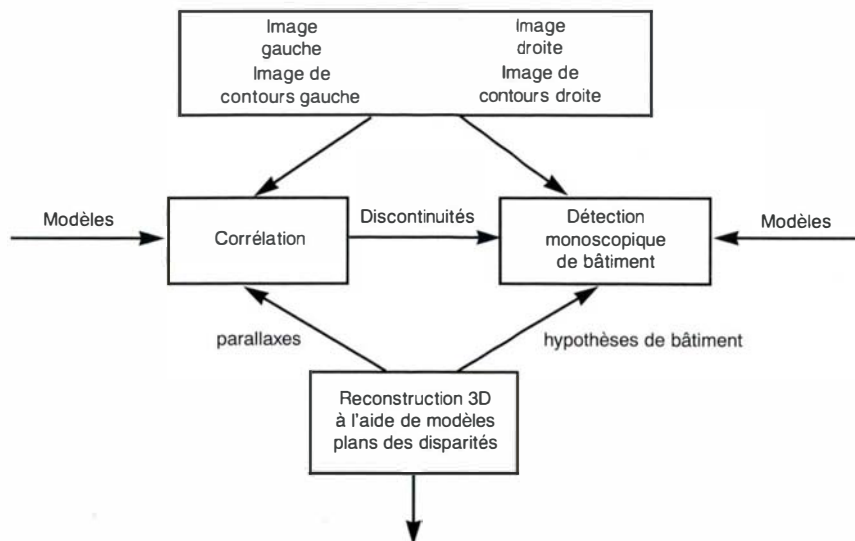


figure B.3.1.

détection et reconstruction en 3-D de bâtiment sur couple stéréo de photographies aériennes

Développements effectués

Dans ce paragraphe, nous allons développer les différentes étapes du processus présenté précédemment : L'étape de corrélation, l'étape de reconnaissance des formes, et enfin l'étape de reconstruction des bâtiments détectés. Nous disposons au départ de deux images ré-échantillonnées selon les lignes épipolaires; l'échelle de prise de vue, pour cette étude, est le 1 : 20 000, un pixel en x ou y correspond à 40 centimètres en planimétrie et un pixel d'écart en parallaxe correspond à une différence d'élévation d'un mètre. Nous disposons aussi des images de contours extraits sur un gradient de Canny-Dérivé.

Corrélation

Le ré-échantillonnage en coordonnées épipolaires du couple stéréo implique que pour chaque point d'une image, son homologue appartienne à la même ligne de l'image correspondante. La corrélation se limite donc à l'étude de chaque ligne séparément.

Deux coefficients de corrélation ont été testés : le coefficient de corrélation classique de Pearson et le coefficient non paramétrique de Spearman où les radiométries des pixels à l'intérieur de la fenêtre de corrélation sont remplacées par le rang qu'occupe le pixel dans l'échelle des radiométries. Ce dernier coefficient est en principe source de robustesse lorsque les données sont affectées d'un bruit non gaussien. En pratique, nous n'avons pas constaté de réelle amélioration avec le coefficient de Spearman, nous nous sommes donc restreints au coefficient classique.

Les contraintes qui guident la recherche des points homologues sont :

- contrainte épipolaire : deux points homologues se situent sur la même ligne,
- contrainte d'ordre : l'ordre des points corrélés le long d'une ligne épipolaire est conservé; ceci est dû au fait que la surface du sol est une surface continue et opaque,
- contrainte de correspondance des contours : nous supposons que l'homologue d'un contour à gauche est un contour à droite et nous guidons sans la contraindre, la recherche d'homologue dans ce sens.

Par ailleurs, une première corrélation par programmation dynamique est effectuée, elle met en correspondance les points des lignes homologues en minimisant une fonction de coût qui tient compte des contraintes précédemment énoncées et de la présence de zones d'occlusion. Combinée avec une corrélation classique ponctuelle, cette étape augmente la rapidité du processus ainsi que sa fiabilité.

La présence de zones d'occlusion visibles sur une image et pas sur l'autre (voir image B.3.4a) est source d'erreurs en partie liées à la contrainte d'ordre. Ainsi, suivant le sens de déplacement le long de la ligne épipolaire et suivant le choix (droite ou gauche) de l'image de référence, les pieds de bâtiments sont abordés avant les toits ou inversement: l'on dispose, dès lors, soit d'une bonne corrélation au niveau du sol, soit d'une bonne corrélation au niveau des toits. L'algorithme tient compte de ces spécificités en combinant les résultats des quatre possibilités énoncées ci-dessus.

Reconnaissance de forme

Pour reconnaître les bâtiments, nous avons défini un modèle générique de ceux-ci. Ce modèle décrit les bâtiments comme des assemblages de structures rectangulaires. Une reconnaissance des structures rectangulaires directement sur la carte des contours se heurte aux problèmes suivants :

- *non-linéarité des bordures de bâtiment* : la frontière qui sépare deux zones de radiométrie différentes n'est en général pas franche (un exemple connu est, par exemple, le phénomène de pénombre séparant les zones d'ombre des zones ensoleillées); on obtient souvent des bordures en "zigzag",

- *absence de contour ou phénomène de tiré* sur les contours séparant des toits et des sols de même intensité lumineuse (parties ensoleillées des toits versus sols clairs, parties à l'ombre des toits versus ombres au sol des bâtiments),

- *multiplicité des structures détectées* : la profusion d'objets linéaires au sol ou sur les toits (rues, trottoirs, limites d'ombre, alignements de cheminées...) parallèles aux bâtiments, est source d'une multitude de détections de rectangles là où un seul nous intéresse,

- *aspect combinatoire de la recherche* : trop d'objets autres que les bâtiments sont présents dans la scène; le nombre de contours à prendre en considération est trop important.

Pour résoudre ces problèmes nous avons décomposé notre reconnaissance de forme en trois grandes étapes (voir figure B.3.2.) :

- chaînage des contours : dorénavant nous travaillerons sur des ensembles connexes de contours correspondant à des bordures réelles,

- sélection des chaînes de contours intéressantes (contours intersectant une zone de changement d'élévation): cette étape diminue fortement l'aspect combinatoire de la recherche et présente l'avantage d'éliminer la plupart des contours qui sont cause de fausse détection,

- recherche des structures rectangulaires à l'aide des groupements perceptuels que nous présentons maintenant.

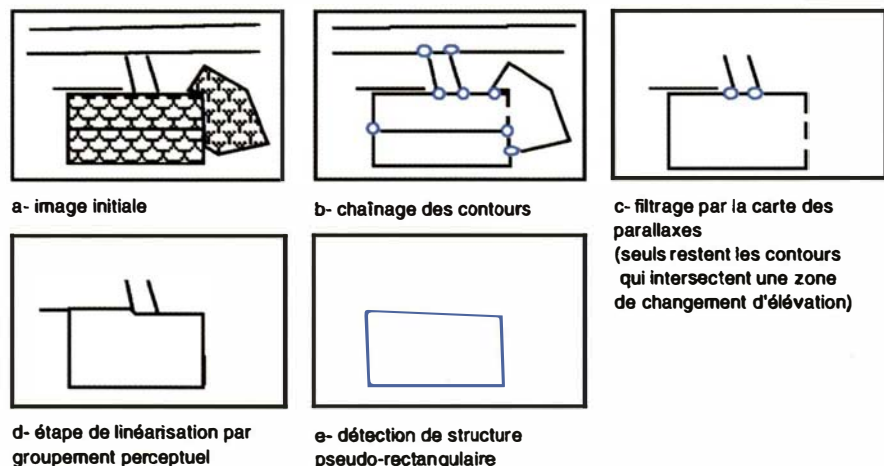


figure B.3.2.

reconnaissance des structures rectangulaires par groupement perceptuel : le programme permet de détecter des lignes tirées complétant ainsi le rectangle à découvrir; noter que le groupement s'attache aussi à réunir des lignes proches et parallèles, faisant dévier le rectangle final

Recherche des structures rectangulaires à l'aide des groupements perceptuels

Le groupement perceptuel désigne la structuration par le système visuel humain de représentations de bas niveau en objets plus complexes. Les lois qui régissent cette structuration (lois Gestalt) en vision artificielle sont entre autres :

- la loi de proximité : les éléments proches ont tendance à être regroupés,
- la loi de similarité : le groupement tend à regrouper les éléments similaires,
- la loi de fermeture : le groupement tend à former une structure fermée,
- la loi de continuation : les éléments qui sont situés sur une même droite ou une courbe régulière sont regroupés,
- la loi de symétrie : les éléments symétriques par rapport à un certain axe sont regroupés.

Concrètement, les primitives de bas niveau sont les chaînes de contours et nous cherchons à les structurer en formes rectangulaires. Cette recherche se déroule en quatre étapes :

- "polygonalisation" des chaînes de contours; désormais les chaînes sont décomposées en segments qui représentent une suite connexe de pixels appartenant à la même droite,

- recherche de structures linéaires; le but de cette étape est de caricaturer la carte des segments obtenus précédemment en portions de droite selon les principes de continuation (les tiretés deviennent des droites), de similarité et de proximité (un groupe de droites parallèles proches est caricaturé en une seule droite de même direction : on évite ainsi la multiplication des rectangles due, par exemple, à la présence de murets...),
- recherche des angles droits entre structures linéaires,
- recherche des rectangles en accord avec la loi de fermeture dans un graphe dont les noeuds sont les intersections des segments orthogonaux et les arcs représentent ces segments.

Reconstruction des bâtiments en trois dimensions

Le principe de cette étape est d'appliquer aux régions qui constituent les bâtiments détectés précédemment, l'algorithme d'approximation de la carte des parallaxes développé par Luo et Maître (voir l'introduction). Pour cela, nous calculons sur l'ensemble des points de la région qui ont été corrélés avec un coefficient de corrélation satisfaisant, le plan oblique le plus proche au sens des moindres carrés.

Toutefois, la présence de bruit non gaussien dans la carte des parallaxes (un faux appariement est un bruit non gaussien) ne permet pas d'obtenir, à tous les coups, un plan oblique aux moindres carrés avec un résidu satisfaisant. Ce cas est donc traité par le calcul d'un plan médian (plus robuste au bruit non gaussien) horizontal.

La forme rectangulaire du bâtiment est alors remplacée par un quadrilatère plan dans l'espace 3-D, on en déduit les coordonnées géographiques des quatre sommets. (voir figure B.3.3.)

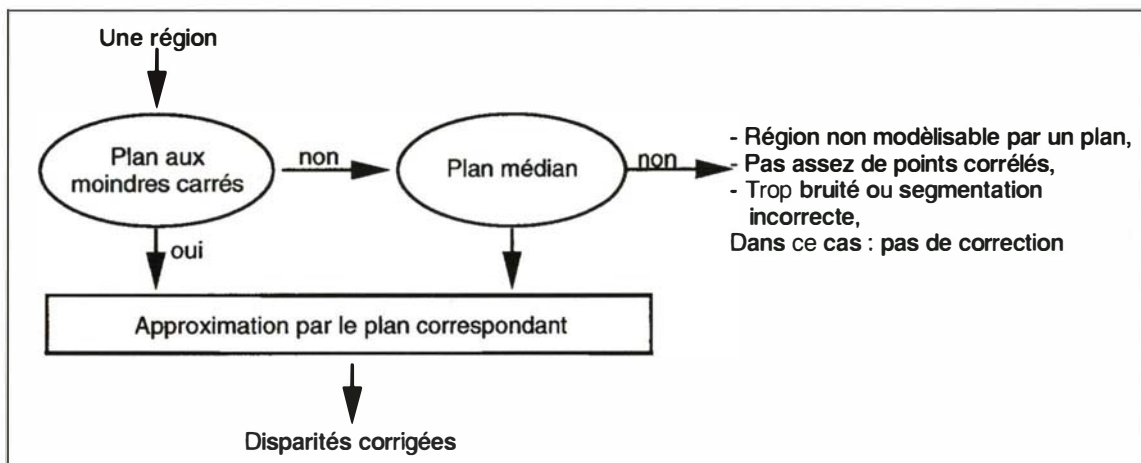


figure B.3.3.
filtrage et approximation des parallaxes

Tests et premières évaluations

Des tests effectués sur le site de Romainville font apparaître une bonne détection (au niveau de l'exhaustivité) des bâtiments isolés correspondant au modèle initial, et, comme on peut s'y attendre, une dégradation du processus en fonction de la densité de l'habitat : la multiplication et la proximité d'objets semblables est source d'erreurs : à a fois pour le corrélateur qui a tendance à confondre les objets, et pour le reconnaissseur de forme qui a tendance à agglomérer des lignes parallèles qui n'appartiennent pas aux mêmes objets et multiplie les fausses alertes.

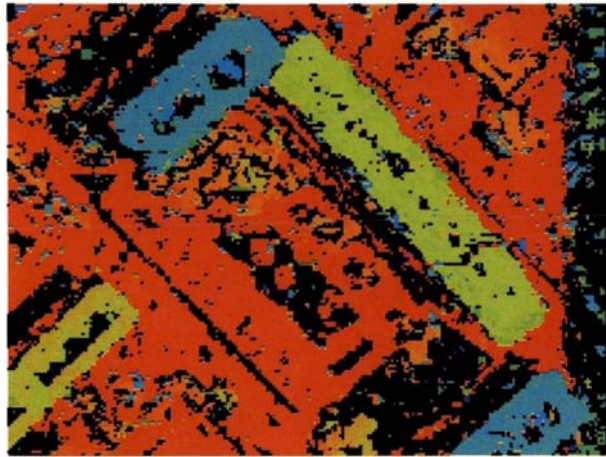
Une première évaluation de la précision, portant sur une vingtaine de bâtiments, fait apparaître un écart de deux pixels environ en planimétrie et de un pixel en élévation par rapport à une saisie manuelle. Ceci est dû principalement aux imprécisions de "caricature" qui se répercutent d'étape en étape pour la partie planimétrique, et au biais introduit par la contrainte d'ordre dans l'étape de corrélation pour le calcul des élévations.

Pour la suite de ce travail, nous nous attacherons à mieux cerner ces erreurs et leur propagation dans le processus comme nous l'indiquons dans le paragraphe C.1.4.1.

Les différentes étapes du processus de restitution automatique de bâtiment :
planche B.3.4.



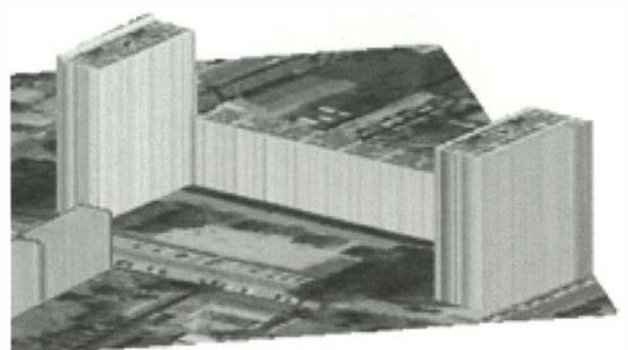
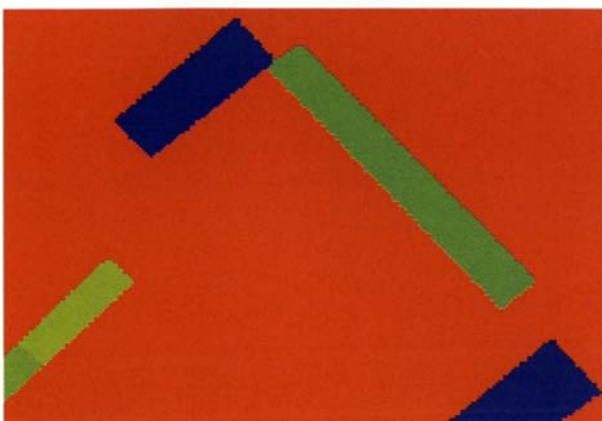
B.3.4.a : les images originales (320 x 240 pixels) ré-échantillonnées selon les lignes épipolaires,



B.3.4.b la carte des parallaxes résultant de l'étape de corrélation, les points qui figurent en noir n'offrent pas un coefficient de corrélation satisfaisant,



B.3.4.c la sélection des chaînes de contours qui intersectent une zone de changement d'élévation, puis le résultat de l'étape de linéarisation sur un extrait de l'image de gauche,



B.3.4.d la détection des formes pseudo-rectangulaires, les résultats après reconstruction et la vue en 3-D

Publications

- [DANG et al 93a] T. Dang, O. Jamet & H. Maître : *Interprétation et restitution automatique des bâtiments en milieu périurbain*, Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 131, pp. 3-11, décembre 1993.
- [DANG et al 94b] T. Dang, O. Jamet & H. Maître : *Reconnaissance de bâtiments par groupement de primitives contraint par un modèle de disparités*, 9ème congrès RFIA'94, Paris (F), pp. 497-505, 1994.
- [DANG et al 94c] T. Dang, O. Jamet & H. Maître : *An image segmentation technique based on edge-preserving smoothing filter and anisotropic diffusion*, IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, pp. 65-69, Dallas (USA), 21-24 avril 1994.
- [DANG et al 94d] T. Dang, O. Jamet & H. Maître : *Applying perceptual grouping and surface models to the detection and stereo reconstruction of building in aerial imagery*, ISPRS Com. III/2, Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, vol. 30, T. 1, pp. 165-172, Munich (D), 5-9 septembre 1994.
- [DANG et al 94e] T. Dang, O. Jamet & H. Maître : *Using Disparity Models and Objects Models to improve Stereo Reconstruction of Building*, Bulletin 5/94, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, pp. 167-173, 1994.
- [DANG et al 94] T. Dang, H. Maître, O. Jamet & O. Dissard : *Using stereo matching and perceptual grouping to detect building in aerial images*, in proceeding of the European Symposium on Signal and Image Processing for Remote Sensing, Rome (I), septembre 1994, à paraître.
- [DANG 95] T. Dang : *Interprétation et restitution automatiques des bâtiments isolés à partir d'un couple stéréoscopique d'images aériennes*, thèse de doctorat, à paraître.

B.4. Lecture automatique de cartes scannées

par Marc PIERROT DESEILLIGNY

Introduction, contexte et objectifs de l'étude

Cette étude se situe dans le cadre de l'aide à la saisie automatique de la BD Topo. En aide à la restitution numérique, une des difficultés majeures est la compréhension globale de l'image: les algorithmes ont plus facilement un comportement local. Or l'information globale existe sur les cartes actuelles qui, se prêtent mieux à une analyse automatique en raison de la normalisation des images de documents

Le principe est alors

- d'utiliser les informations extraites de la carte pour créer une base de données d'attente, d'un contenu moins riche que la BD Topo, mais obéissant aux mêmes spécifications de représentation,
- d'utiliser simultanément la carte et l'image, cette dernière étant utilisée pour un recalage fin (affinage de la précision géométrique).

Les utilisations indirectes que l'on envisage pour les résultats de cette action impliquent qu'elle doit conduire à une base de données ayant un coût marginal par rapport au coût de la restitution photogrammétrique de la BD Topo. Notamment, il est nécessaire d'arriver à une interprétation totalement automatique avec vérification humaine sur les seuls cas douteux alertés par le programme. En effet, la vérification exhaustive par l'opérateur a un coût non négligeable par rapport à une saisie entièrement manuelle.

A titre d'ordre de grandeur, il est souhaitable d'arriver à une vérification sur 10% des cas avec seulement 1% d'erreurs non alertées. Il s'agit d'un objectif ambitieux compte tenu de l'état de l'art actuel en lecture de cartes. Cependant, une particularité technique du contexte IGN, qui contribue à rendre cet objectif réalisable, est que, d'une part, l'on dispose des planches-mères, et que, d'autre part, la cartographie au 1 : 25000 de la France est relativement homogène.

Jusqu'à septembre 1994, l'investissement de l'IGN dans la lecture automatique de cartes (exception faite des travaux sur l'interprétation conjointe carte-image (voir C.1.3.4.), [GUÉRIN 94]) a essentiellement consisté à encadrer scientifiquement la thèse de Marc Pierrrot Deseilligny effectuée au Ministère de la Défense. Ici, on décrit essentiellement les travaux réalisés au cours de cette thèse. Depuis Octobre 1994, une équipe de trois personnes est mise en place au laboratoire MATIS pour travailler sur la lecture de cartes; en raison de la récente mise en oeuvre de cette équipe, les travaux réalisés dans ce cadre sont présentés comme perspective à la fin de l'article et en C.1.6.

Le thème le plus avancé est celui de la lecture des écritures pour lesquelles on arrive, avec 10% d'alerte, à des taux d'erreurs inférieurs à ceux d'une saisie manuelle (en tout cas compatibles avec les spécifications de la BD-Nyme). On va donc décrire de manière détaillée la méthode de lecture des écritures, on présentera ensuite, de manière plus succincte, les travaux effectués sur les réseaux et le bâti avant de conclure sur les développements à effectuer.

Lecture des écritures

Présentation générale

La reconnaissance des écritures dans le contexte cartographique présente un certain nombre de spécificités qui interdisent de réutiliser facilement des logiciels commerciaux. Les difficultés spécifiques sont :

- Le fait que les écritures ne représentent qu'une partie de l'information à extraire, ce qui crée des problèmes de confusion (par exemple entre un "L minuscule" et un tiret de route) et, surtout, des problèmes de connexion car l'ouverture des planches par les écritures n'est jamais parfaite;

- Les écritures présentent des échelles et, surtout, des orientations multiples;

- Il n'existe pas de régularité dans la disposition des écritures qui permette de reconnaître facilement les blocs de caractères; par ailleurs, l'espacement entre les caractères d'une même chaîne est très variable d'une chaîne à l'autre.

- Inversement, pour développer une méthode fiable de reconnaissance, on dispose de facilités spécifiques au contexte :
- le temps de calcul n'est pas un critère prépondérant;
 - on peut disposer facilement d'un dictionnaire des formes de caractères présents sur une facture de carte donnée.

On décide donc de s'orienter vers les méthodes d'appariement direct des références sur les formes à identifier; ces méthodes ne sont ni très rapides ni adaptées au contexte "omni-fonte" mais, on vient de voir que ceci n'est pas un problème dans le contexte cartographique. Le choix d'une architecture pour le module de reconnaissance des écritures a été guidé par les remarques élémentaires suivantes :

- On a intérêt à terminer par les caractères connectés, on peut ainsi limiter l'espace de recherche en se restreignant à ceux qui complètent de manière cohérente les chaînes construites à partir des caractères non connectés reconnus,
- Il est impossible de prendre une décision fiable au niveau de la particule connexe; par exemple, confusion entre "u" et "n" à π près, confusion entre "s" et "S" à une homothétie près; le module d'analyse des particules connexes doit donc renvoyer, pour chaque particule, un ensemble d'hypothèses caractères,
- La plupart des ambiguïtés précédentes peuvent être levées en sélectionnant pour chaque particule l'hypothèse qui permet une agrégation à l'intérieur de chaînes cohérentes (du point de vue de la police, de l'orientation etc....),
- Certaines ambiguïtés (telle que "lettre O - chiffre 0") nécessitent des règles syntaxiques, ces règles fonctionnent surtout sur des chaînes complètes, elles ne doivent donc être utilisées qu'à la fin.

Les remarques précédentes conduisent à choisir l'architecture suivante :

- Analyse des particules connexes, à l'issue de laquelle on obtient, pour chaque particule un ensemble d'hypothèses-caractères,
- Chaînage des hypothèses, on sélectionne les hypothèses qui permettent l'agrégation en chaînes cohérentes,
- Recherche des caractères connectés, cette recherche s'effectue à partir des hypothèses robustes de l'étape précédente,
- Utilisation de règles syntaxiques pour résoudre les dernières ambiguïtés et détection des chaînes à alerter.

Analyse des particules connexes

L'analyse des particules connexes se décompose ainsi :

- normalisation aux rotations,
- calcul d'un vecteur de forme invariant par homothétie translation et présélection des références,
- estimation des paramètres de similitude,
- calcul d'une image appariale entre forme et références,
- amélioration des paramètres de similitude et sélection finale.

La normalisation aux rotations s'effectue sur le principe de la normalisation par axes d'inertie. La figure B.4.1 représente différents "a" de la carte et, en dessous, leurs formes normalisées par alignement de l'axe principal sur une diagonale. Cette normalisation donne en général de bons résultats. Cependant elle devient fortement instable quand l'ellipse de la forme est presque circulaire comme on peut le constater sur la figure B.4.2 où les "M" normalisés ont des orientations très variables alors que les "M" initiaux sont tous horizontaux.



figure B.4.1



figure B.4.2

En fait on a démontré, au cours de ce travail, que, selon un formalisme qu'il serait trop long de détailler ici (voir [PIERROT 94 c], Annexe A), toute normalisation aux rotations est nécessairement instable en certains points de l'espace des formes. On est donc conduit à définir, non plus une seule normalisation, mais un ensemble de normalisations en associant à chacune un estimateur de stabilité. Pour chaque forme c'est alors la normalisation estimée comme la plus stable qui est utilisée.

Une fois les formes normalisées aux rotations, on calcule un vecteur de forme invariant par homothétie-translation. Celui utilisé est l'égalisation d'histogramme: en assimilant la forme à une densité de probabilité, on effectue le seul changement de coordonnées, séparable en x et y, qui donne des probabilités projetées constantes. Le processus de construction est illustré sur la figure B.4.3.

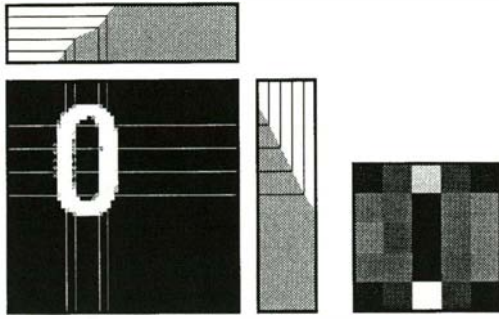


figure B.4.3

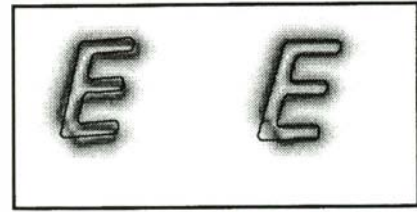


figure B.4.4

Ensuite, on compose les rotations, homothéties et translations calculées, lors des normalisations, pour estimer la similitude entre la forme et la référence. Cette similitude est parfois bruitée, comme on peut le constater sur la partie gauche de la figure B.4.4; cette figure représente, en fond, le gradient de la forme et, en superposition, les contours de la forme auxquels on a appliqué la similitude estimée. On cherche alors à améliorer cette estimation en formalisant le problème comme un problème de minimisation local dans l'espace des paramètres de la similitude. La partie droite de la figure B.4.4, représente les contours obtenus en utilisant la similitude après amélioration.

Chaînage des hypothèses

Le chaînage des hypothèses consiste à sélectionner, pour chaque particule, l'hypothèse permettant les meilleurs regroupements avec les hypothèses voisines. La difficulté du problème vient de ce qu'il convient d'effectuer un raisonnement global, il est en général insuffisant de considérer les groupes de 2 ou 3 hypothèses. Inversement, les dimensions du problème ne permettent pas une approche purement combinatoire.

La figure B.4.5 représente quelques étapes de la formalisation :

- A: image initiale;
- B: ensemble des hypothèses générées par les particules; on voit par exemple que "n" a généré "u" et "n" et que "V" a généré "v" et "V";
- C : on formalise le problème en terme de graphe, deux hypothèses donnent naissance à un arc si elles sont compatibles; on a représenté ici un petit sous-ensemble des couples a priori compatibles; on cherche alors à décomposer ce graphe en plus longues chaînes;
- D : en combinant différentes techniques telles que : programmation dynamique, heuristique (filtrage par arbre de poids minimum), exploration combinatoire etc..., on arrive à trouver, en temps raisonnable, une solution acceptable au problème; il existe encore quelques ambiguïtés, telles que la lettre i majuscule et la lettre l minuscule qui ne sont pas résolues car elles nécessitent des connaissances syntaxiques.

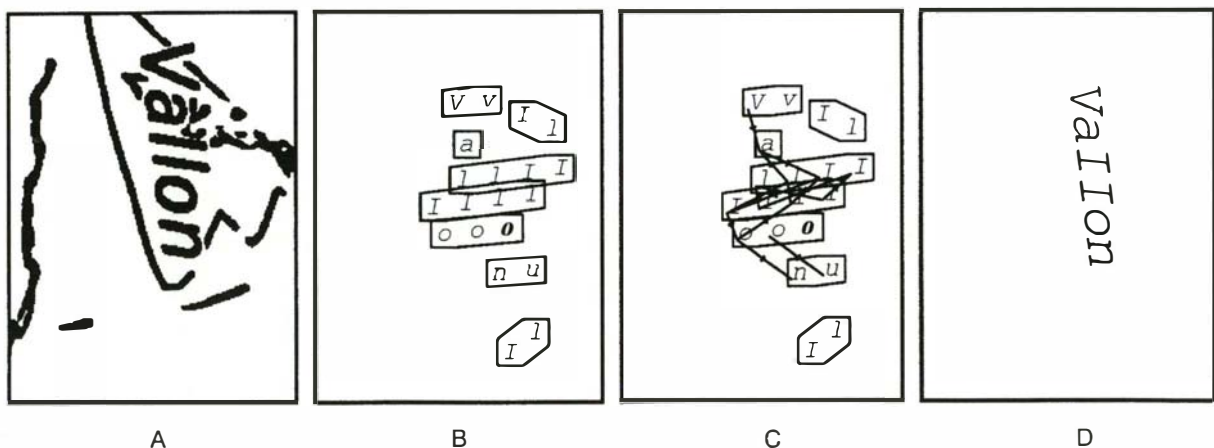


figure B.4.5

Recherche des caractères connectés

Le principe de la recherche des caractères connectés est relativement simple puisqu'il suffit d'aller vérifier la présence, à un endroit donné de l'image, des caractères appartenant à la même police que les chaînes déjà reconnues. L'identification se fait par appariement des contours de la référence cherchée sur l'image.

En pratique, ce module est un des plus compliqués, les figures B.4.6 et B.4.7 illustrent le type de problèmes que l'on rencontre:

- figure B.4.6: inclusion des caractères, le "m" peut aussi bien être interprété comme un "n" ou un "r" connecté à un certain environnement, le programme doit résoudre ce type de conflit; il doit donc disposer d'une connaissance lui permettant de décider que, puisque le "m" inclut le "n" et non l'inverse, c'est le "m" qui doit être détecté dans cette configuration;

- figure B.4.7: fausse détection: le programme arrive à apparier parfaitement les contours du "F" de référence; pour éviter ce type de fausse détection on est amené à regarder si les extrémités du caractère recherché se prolongent dans l'image; quand c'est le cas, comme sur la figure présentée, le caractère est réfuté ou mémorisé comme douteux.



figure B.4.6

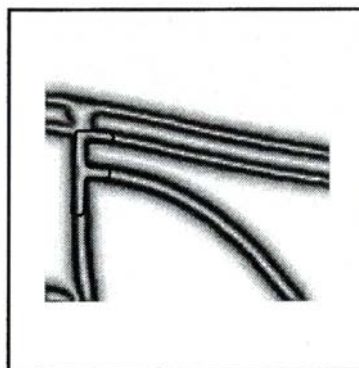


figure B.4.7

Règles syntaxiques et alertes. Résultats

Après le module de recherche des caractères connectés, on dispose de chaînes de caractères complètes. Ces chaînes sont ensuite décomposées en mots en fonction de l'espacement inter-lettre; on utilise alors un certain nombre de règles syntaxiques élémentaires, essentiellement relatives aux couples de lettres consécutives valides, pour lever les dernières ambiguïtés.

On entre ensuite dans la phase de vérification. On alerte toutes les chaînes qui contiennent au moins un caractère douteux (corrélation faible) ou qui violent une règle syntaxique. Dans cette phase de vérification, on peut utiliser facilement des règles de plus haut niveau que celles qui sont utilisées pour lever les ambiguïtés.

Sur les planches testées (planche de noir et de bleu, au 1 : 25000 de Noves), on obtient, avec 1500 chaînes présentes, un taux d'erreurs non détectées de 0.8 % avec 10% de chaînes alertées (la moitié de ces chaînes sont alertées à tort). Ceci permet de considérer la méthode comme pré-opérationnelle.

Réseaux et bâti

Les deux autres thèmes abordés sont les réseaux et le bâti.

Réseaux

Les réseaux abordés ont été le réseau routier et le réseau des limites administratives. Pour chaque réseau, on a développé une partie spécifique d'algorithmique bas niveau (analyse locale), par exemple :

- pour le réseau routier, appariement de traits parallèles, connexion des pointillés possibles, fermeture morphologique, squelettisation, approximation polygonale,

- pour les limites administratives, sélection des disques par analyse des particules connexes, sélection (sur l'approximation polygonale du squelette des points noirs) des traits qui sont dans le prolongement d'un disque détecté.

On a ensuite développé des algorithmes de reconstruction en mode vecteur qui permettent d'obtenir un graphe topologiquement correct à partir du graphe dégradé résultant de la phase de bas niveau. Ces algorithmes s'avèrent assez généraux, et, d'un réseau à l'autre, les principales adaptations consistent à changer certains seuils (poids des arcs, seuils angulaires, taille maximale des impasses etc....).

Bâti

Après les réseaux et les écritures, le bâti constitue le thème le plus important de la planche de noir. Dans le cadre de la constitution de la BD topo, l'intérêt intrinsèque de son extraction ne sera évident que si l'on réussit à utiliser les bâtiments de la carte pour guider la recherche sur photos.

Cependant, dans le cadre d'une analyse exhaustive de la planche de noir, le bâti constitue une couche qui interfère très fréquemment avec le réseau routier. En fait les essais menés sur l'extraction du réseau routier en milieu urbain montre que l'on n'obtient pas une qualité d'extraction suffisante si l'on ne modélise pas les interférences entre les deux thèmes.

Pour ce thème on s'est restreint à un modèle simple de bâtiment: polygone aux côtés deux à deux orthogonaux (on couvre 95% des bâtiments présents). On a développé l'algorithme de bas niveau suivant qui donne des résultats acceptables :

- segmentation à partir d'une image de distance calculée sur une image binaire, les blocs épais correspondent approximativement aux bâtiments,
- estimation, pour chaque bloc, de la direction principale définie à 90° près,
- polygonalisation en contraignant les côtés résultants à être alignés, modulo 90°, sur la direction principale estimée,
- affinement de l'appariement entre le modèle et l'image.

Presque tous les bâtiments obéissant au modèle sont correctement extraits. Il reste à développer une procédure de validation tant pour chaque bâtiment (par seuillage d'un appariement vecteur image) que pour l'ensemble des bâtiments extraits (leurs positions relatives obéissent à un certain nombre de règles).

Conclusion : "Vers une compréhension globale de la carte ?"

L'image gauche de la figure B.4.8 montre un morceau de carte en mode maillé et, à droite de celle-ci, les chaînes de caractères, réseaux de routes, réseaux administratifs et bâtiments extraits. Les éléments alertés (chaînes ou portion de réseau routier) ne sont pas différenciés sur cette image. Il reste encore un travail très important à effectuer pour arriver à la qualité requise. Pour ceci, il est maintenant nécessaire d'aborder le problème de la compréhension globale de la carte.

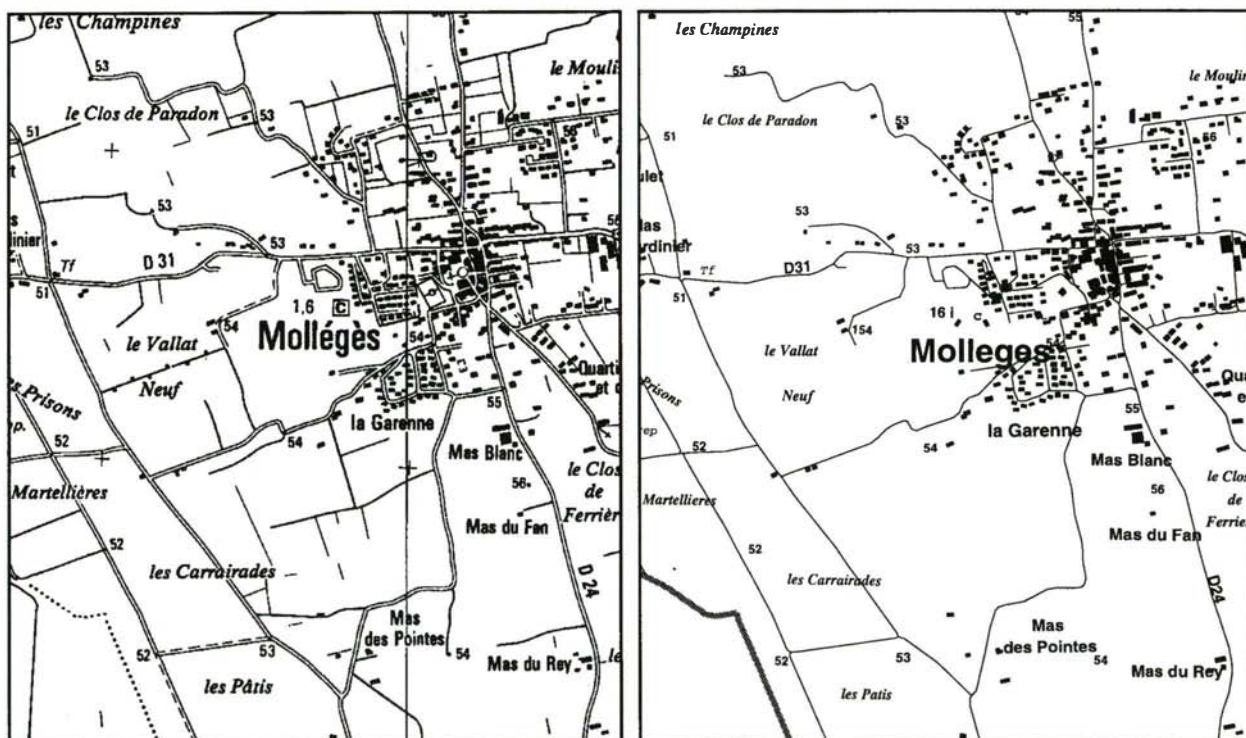


figure B.4.8.

Cette compréhension globale se justifie par différents aspects :

- Nécessité d'extraire, de manière prioritaire, les objets les plus simples afin de les effacer progressivement et de faciliter l'extraction des thèmes restants.
- Nécessité de valider les reconstructions par des règles inter-couches. Ces règles peuvent être relatives au mode de rédaction cartographique; par exemple, on sait que les chaînes de caractères interrompent la représentation du réseau; donc, les chaînes reconnues permettent de valider les hypothèses de re-connexion du réseau. Ces règles peuvent aussi être relatives à la réalité des objets; par exemple, un croisement entre une route et un cours d'eau valide la détection d'un pont douteux (ou déclenche la recherche).
- Nécessité de créer des liens topologiques entre objets reconnus, tels que l'association "chaîne/objet qualifié par la chaîne" ou la fusion de portions de différents réseaux.
- Nécessité d'utiliser la redondance d'information existant sur les différentes planches; par exemple le réseau routier extrait sur la planche de rouge permet de qualifier le réseau de la planche de noir et de fiabiliser l'extraction des routes principales.
- Nécessité d'arriver à une compréhension suffisamment complète pour éviter les erreurs d'omission sans vérification exhaustive; c'est à dire que l'on souhaite soumettre à l'opérateur, à la fin du processus, une image à peu près vide des éléments qui n'ont trouvé d'interprétation dans aucun thème.

Quelques essais particuliers ont été faits dans ce sens. Notamment les interactions entre routes et écritures ont été abordées tant pour le problème de la validation des connexions que pour celui de l'attribution des noms de routes aux routes. Il s'agissait essentiellement de "dégrossir" le problème et d'en évaluer la faisabilité. Les prolongements de cette étude sont actuellement les suivants:

- Interaction entre couches: le nombre très important de cas particuliers à traiter semble rendre difficile la généralisation d'une approche au cas par cas. La thèse de R. Mariani va donc s'intéresser à la formalisation et à la systématisation des interactions entre couches.
- Lecture de l'ensemble des planches: une thèse est effectuée, en collaboration entre l'IGN et l'université de Paris-5 (thèse de V. Mehas-Yedid) sur l'analyse de la planche de vert. L'analyse de la planche de rouge (sans courbes de niveau) a été effectuée à l'IGN (travail de F. Lecourt) et ne semble pas poser de problème. Par ailleurs il est prévu de reprendre le travail "d'épluchage" systématique de la planche de noir".
- La gestion globale du "chantier" analyse de cartes est en train d'être définie.

Publications

- [GUÉRIN 94] P. Guérin, S. Airault, H. Maitre & O. Jamet : *"Interprétation conjointe cartes scannées et images aériennes*, 3ème colloque national sur l'écrit et le document (CNED'94), pp 185-194, Rouen (F), juillet 1994.
- [PIERROT 94 a] M. Pierrot Deseilligny, H. Le Men & G. Stamon : *Extraction et identification de chaînes de caractères dans le contexte cartographique*, 9ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA'94), pp. 545-556, Paris, janvier 1994.
- [PIERROT 94 b] M. Pierrot Deseilligny, H. Le Men & G. Stamon : *Lecture automatique des écritures sur cartes scannées*, 3ème colloque national sur l'écrit et le document (CNED'94), pp. 195-204, Rouen (F), juillet 1994.
- [PIERROT 94 c] M. Pierrot Deseilligny : *Lecture automatique de cartes*, thèse de l'université de Paris-5, octobre 1994.

B.5. Développement d'un procédé de télémétrie laser aéroportée à champ large

par Olivier BOCK

Introduction

Depuis le début du siècle il a été observé que de nombreux phénomènes géophysiques (mouvements d'origine tectonique, glissements de terrain, variations de contraintes dans le sous-sol...) se traduisent par une déformation verticale du sol d'amplitude presque toujours plus faible que pour les composantes horizontales (typiquement de l'ordre du millimètre). Les méthodes actuelles pour l'observation de tels mouvements sont principalement : le nivellement de précision, le positionnement par procédé GPS différentiel [FOURMAINTRAUX et al 94], l'utilisation d'inclinomètres; mais elles restent très locales et sont difficilement interprétables (sensibilité aux perturbations locales).

Il se dégage de ces constatations le besoin d'une nouvelle méthode de mesure de mouvements verticaux, permettant de traiter une surface et non pas un cheminement linéaire. Elle doit être rapide (moins d'un jour) et très précise (moins du millimètre).

A l'IGN nous avons alors imaginé une méthode aéroportée, dérivée de la méthode ALRS de la NASA [KHAN et al 82]. Le système de mesure est composé d'un télémètre laser impulsif en champ divergent, permettant de mesurer simultanément un ensemble d'échos renvoyés par des rétro-rélecteurs placés au sol. Les mesures sont suivies d'un traitement du signal et d'une optimisation restituant des distances avec une précision inférieure au millimètre.

Contexte - objectifs

Le procédé a été breveté en 1990 par l'IGN et un contrat a été signé avec ELF-AQUITAINE en 1992, qui a participé au financement d'une partie des études. Après une première étape de simulation numérique, la réalisation d'un prototype a été engagée. Cette dernière étape a nécessité l'achat de l'ensemble des matériels et leur caractérisation. Une expérimentation aéroportée initialement prévue pour 1994 a été retardée car la précision du système était largement inférieure à celle attendue. Une étude plus approfondie du laser a permis de mettre en évidence une limitation intrinsèque, liée à la technologie employée. Nous avons alors réalisé des essais avec un autre laser pour lequel les résultats ont été concluants. L'objectif est maintenant de préparer le prototype afin de réaliser une première mission dans des conditions réelles. Celle-ci sera suivie d'une exploitation des données et éventuellement d'une deuxième mission, puis de l'industrialisation du procédé.

Principe du procédé et instrumentation

Principe

Le système présenté à la figure B.5.1. est composé :

- d'un ensemble de rétro-rélecteurs laser (coin de cube) répartis sur une grille d'environ dix kilomètres de côté et de un kilomètre (plus ou moins cent mètres) de maille, orientés vers le ciel et liés au sol par un ancrage profond,
- d'un télémètre laser embarqué dans un avion et pouvant mesurer simultanément, pour une impulsion émise, un ensemble d'échos renvoyés par les réflecteurs. Cela est facilement réalisable en émettant un faisceau divergent, plutôt que de faire appel à un système mécanique asservissant plusieurs faisceaux sur un nombre de réflecteurs assez faible, tel que cela était proposé dans [KHAN et al 82],
- d'un récepteur GPS embarqué permettant d'avoir la position approchée de l'avion à chaque tir (à dix centimètres près en mode différentiel).

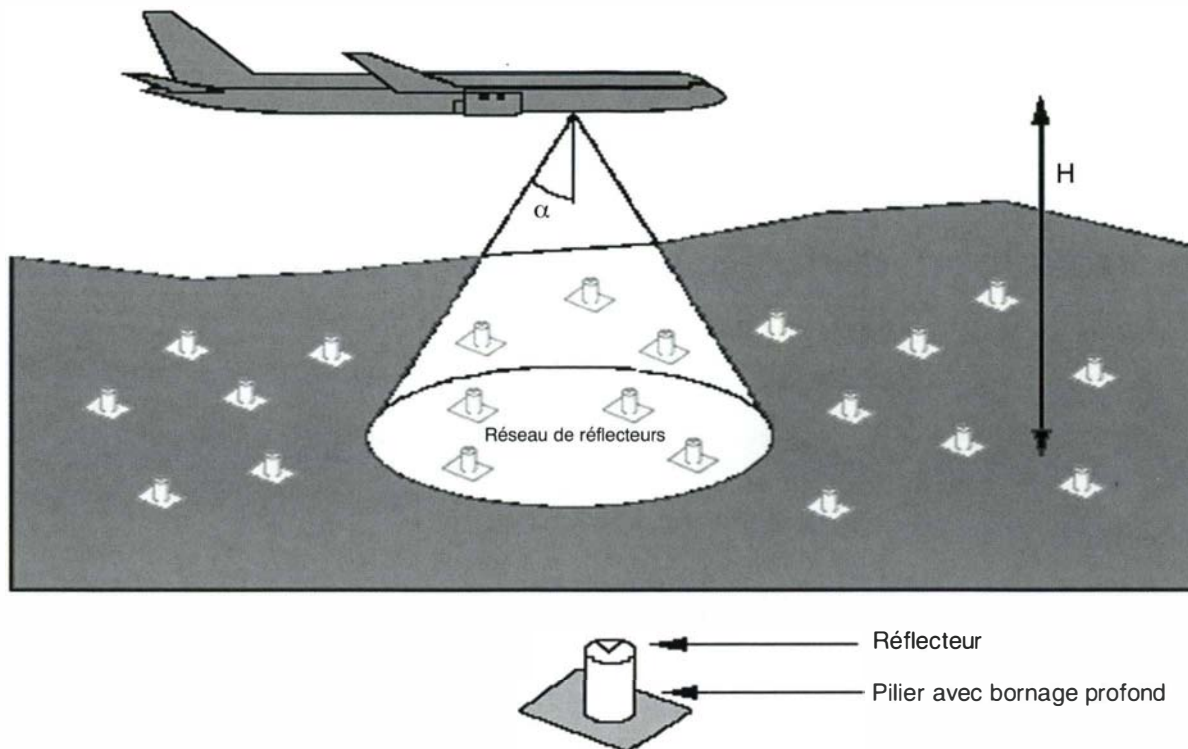


figure B.5.1. : principe des mesures

La campagne de mesure se fait en trois étapes :

- une cartographie approchée du réseau de réflecteurs (au mieux cinq centimètres) réalisée une seule fois (par une technique GPS par exemple),
- l'acquisition des mesures en vol (échos des réflecteurs et GPS),
- un traitement du signal et l'exploitation des données de distance par une méthode d'optimisation utilisée en aérotriangulation [MILLON 91].

Nous avons étudié la précision de ce procédé à l'aide d'une simulation complète tridimensionnelle [KASSER et al 92] avec les hypothèses suivantes :

- précision des positions de l'avion : 50 cm,
- précision des positions des réflecteurs : 10 cm,
- précision en monocoup des mesures du télémètre : 3 cm,
- bruit météorologique : 1 à 5 ppm.

En prenant comme critère la précision du mouvement vertical, que nous avons fixée à un millimètre, différents paramètres ont pu être optimisés :

- l'angle de divergence du laser : $\approx 15^\circ$,
- l'altitude de l'avion : $H > 5000$ mètres afin d'avoir au moins vingt réflecteurs dans le champ,
- une durée d'impulsion laser de l'ordre de quelques nanosecondes.

En effectuant alors un grand nombre de mesures (100 000 distances) une précision inférieure à 1 mm est atteinte en altitude ainsi qu'une précision de 4 mm en horizontal.

Les hypothèses prises semblaient réalistes, il restait toutefois à en faire la preuve expérimentale en réalisant un prototype de télémètre en champ large et en vérifiant que les 3 cm sont atteints en monocoup.

Instrumentation

Le choix des éléments composant le télémètre laser doit répondre à plusieurs contraintes, notamment pour le laser :

- une impulsion d'énergie suffisante pour envisager son utilisation aéroportée
- une durée d'impulsion inférieure à 10 ns
- une longueur d'onde située dans une fenêtre de transmission de l'atmosphère
- une cadence de tir suffisante pour acquérir un grand nombre de mesures par passage sur le site
- une stabilité des caractéristiques du faisceau.

La divergence du faisceau est obtenue soit à l'aide d'une lentille divergente, soit à l'aide d'un dépoli.

La précision de 3 cm correspond à une précision en chronométrie de 200 ps en monocoup. L'utilisation d'une détection par seuillage, classique en télémétrie laser (par exemple sur satellite, cf [DEGNAN 93]), s'avère inapplicable pour deux raisons. D'une part, la grande disparité des amplitudes des échos renvoyés par des réflecteurs situés en des points extrêmes du champ interdit un seuillage par rapport à une valeur fixe. D'autre part, ce type d'estimateur ne permet pas d'arriver à la précision que nous souhaitons.

L'emploi d'un échantillonneur associé à un traitement numérique du signal s'avère alors nécessaire pour extraire les positions des réflecteurs à partir des enveloppes temporelles des échos (mesurés par une photodiode). La précision ainsi atteinte est nettement supérieure à celle des méthodes classiques. Nous aboutissons donc au schéma de la figure B.5.2., l'échantillonneur étant un oscilloscope numérique d'une fréquence d'échantillonnage de 2 Géch./s.

La précision temporelle de l'échantillonneur est excellente : elle n'est pas mesurable à l'échelle de la picoseconde. Son bruit en tension est également très faible, de l'ordre de $230 \mu V$ pour le calibre utilisé lors de nos mesures. La précision de la détection dépend donc principalement du rapport signal à bruit des mesures, les bruits additifs proviennent de la photodiode (bruit quantique), de l'amplificateur (bruit thermique) et de l'oscilloscope.

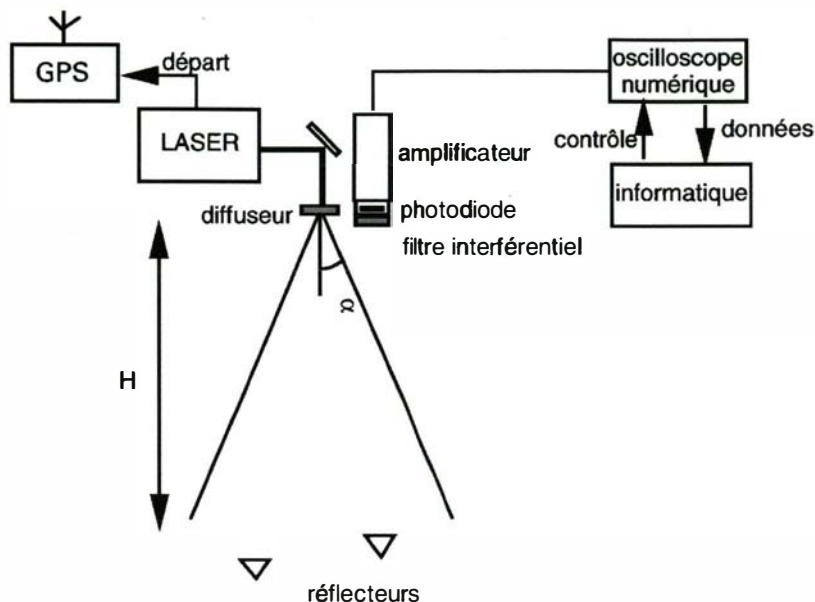


figure B.5.2. : instrumentation du télémètre laser

Le choix d'un laser Nd : YAG à 1,064 mm, de 350 mJ, d'une impulsion de 5 ns et d'une fréquence de répétition de 10 Hz semble a priori convenir. Le bilan de liaison permet alors de chiffrer la puissance reçue, elle vaut $7 \mu W$. Il est donc nécessaire d'amplifier ce signal, ce que nous réalisons avec un amplificateur transimpédance de 10 000 V/A. Le rapport signal sur bruit (RSB) en réception est alors supérieur à 150.

Nous avons constaté que l'emploi d'une optique en réception n'apportait pas un gain significatif. La taille du faisceau renvoyé par un réflecteur fait environ 40 cm, de plus le champ utile étant de +/- 15° cela conduit à une ouverture numérique très faible, donc difficile à réaliser. Nous préférons utiliser une photodiode de grande surface active (1 cm²) placée près de l'axe d'émission.

L'instrumentation étant définie il reste à préciser les méthodes d'estimation des positions des échos dans les enregistrements ainsi que la précision de l'ensemble.

Précision attendue

Précision de l'estimation des distances

Soit $s(t)$ le signal émis par le laser et $x(t)$ le signal issu de la photodiode, modélisé par $x(t) = s(t) * h(t) + b(t)$ où $h(t)$ est la réponse impulsionnelle de l'ensemble du processus, $b(t)$ un bruit additif et $*$ l'opérateur de convolution. Nous désirons estimer à partir de $x(t)$ la durée de propagation de l'impulsion depuis son émission par le laser, ou plus exactement la durée entre les échos. Deux types d'estimateurs peuvent être utilisés : l'estimateur du barycentre de l'impulsion ou l'estimateur du maximum de la fonction d'intercorrélation. Ce sont des méthodes couramment utilisées en radar. Le premier estimateur fournit une position de l'impulsion dans l'enregistrement, le second passe par la corrélation du train d'impulsions $x(t)$ avec une impulsion de référence $y(t)$. Ils sont de précision théorique comparable mais la mise en oeuvre du barycentre est plus délicate car nos signaux ne sont pas de réponse finie, une troncature entraîne donc des biais dans l'estimation.

Nous avons évalué la précision des estimateurs [BOCK 94] pour un signal triangulaire et un rapport signal-bruit de 100. On obtient 8,5 ps soit 1,3 mm pour l'intercorrélation et 10 ps soit 1,5 mm pour le barycentre. Nous avons également évalué les précisions des deux estimateurs, en présence d'un signal large bande (21 GHz dans le cas d'un laser multimode longitudinal) convolué avec la réponse impulsionnelle de la photodiode (fréquence de coupure à 50 MHz). L'échantillonneur dispose d'un filtrage anti-repliement à 500 MHz d'ordre 3, il n'est donc pas complètement insensible à un signal de fréquence légèrement supérieure à 500 MHz. Dans ce cas, en l'absence de bruit, la précision de l'estimateur de l'intercorrélation est de 15 ps. En tenant compte du bruit, nous pouvons arriver à une précision globale en monocoup de 17 ps soit 2,5 mm, avec un rapport signal-bruit de 100.

Incertitude due au laser

Jusque là nous avons considéré uniquement les aspects énergie, longueur d'onde et durée d'impulsion du laser, sans préciser la technologie employée : le type de cavité et le type de déclenchement. Nous nous sommes intéressés à deux lasers de types différents :

- un laser à cavité instable, miroir de couplage de réflectivité variable (supergaussien) et déclenchement actif. Ces deux premières caractéristiques permettent d'extraire efficacement l'énergie du milieu amplificateur et de produire un mode transverse gaussien de forte puissance. L'impulsion ainsi obtenue est typiquement de l'ordre de la nanoseconde (cinq ns dans notre cas),

- un laser à modes bloqués, cavité stable, miroir uniforme, déclenchement passif-actif. Ce laser produit un train d'impulsions très courtes (typiquement la dizaine de picoseconde) duquel une impulsion est extraite puis amplifiée (100 ps dans notre cas).

Considérons l'expérience suivante : on place deux photodiodes dans le faisceau et on échantillonne les impulsions détectées. Des erreurs d'estimation peuvent alors apparaître si les deux impulsions sont décalées, ou si les impulsions ont des enveloppes temporelles très différentes ce qui entraîne une erreur dans l'estimation. Ces deux phénomènes locaux existent toujours dans le faisceau, quel que soit le type de laser utilisé. Il est nécessaire de quantifier les retards ainsi induits et les échelles de temps sur lesquelles ils peuvent être considérés comme stationnaires. Nous allons donc, d'une part, rechercher les phénomènes responsables des distorsions et instabilités du faisceau et, d'autre part, rechercher les échelles de temps caractéristiques de ces phénomènes.

Précisons d'abord que la construction d'une impulsion dans un laser déclenché est gouvernée par des équations déterminées entièrement par le type de cavité (géométrie de la cavité, miroir de couplage, milieu amplificateur). Les caractéristiques de l'impulsion dépendent par contre fortement des conditions initiales (répartition du champ, pompage...). Des perturbations en cours de construction produisent alors des distorsions du faisceau. Deux phénomènes agissant ensemble sont responsables de ces distorsions : la saturation du gain et la diffraction. La saturation non-uniforme du gain va moduler le diamètre du faisceau (notamment au niveau de la pupille de sortie du laser). La propagation par diffraction va alors se traduire localement dans le faisceau par des enveloppes temporelles différentes [McALLISTER et al 70].

De plus, dans le cas d'une cavité de coefficient de réflexion non uniforme le profil de pertes est variable de l'axe au bord de la cavité. Ceci va alors entraîner une vitesse de construction de l'impulsion plus lente sur les bords du faisceau et donc des retards systématiques (biais). Les distorsions du faisceau ont dans ce cas un comportement moyen pouvant être décrit de manière déterministe par l'effet du profil de pertes (le retard moyen a une allure quadratique centrée sur l'axe). On peut aussi les traduire par une divergence du faisceau variable [CAPRARA et al 92]. Ce phénomène devrait être absent dans un laser conçu autour d'une cavité stable équipée de miroirs de réflectivité uniforme, comme cela est le cas dans le second laser. Ce dernier a de plus l'avantage de produire des impulsions plus courtes, augmentant par là la précision de la chronométrie.

Les caractéristiques de l'impulsion dépendant des conditions préalables à sa construction, celles-ci nous apparaissent aléatoires de tir à tir. A cette échelle de temps (de l'ordre de la seconde) il y aura donc une fluctuation des enveloppes temporelles et du profil transverse du faisceau. Ce phénomène est responsable de la dispersion des mesures de tir-à-tir. Pour s'en débarrasser, il faut donc considérer des moyennes à court-terme, c'est-à-dire sur plusieurs tirs (typiquement une centaine). On peut alors mettre en évidence des biais (retards moyens) dans le faisceau.

Un autre phénomène apparaît alors à long terme : l'évolution des paramètres du laser (pompage optique, effets thermiques...) qui vont alors modifier la répartition de ces biais dans le faisceau. A cette échelle de temps (de quelques minutes à quelques heures) la stabilité de pointé peut caractériser le faisceau. On peut l'étudier en suivant l'évolution des moyennes précédentes. Ce phénomène est particulièrement gênant dans le cas d'une cavité à miroir de coefficient de réflexion variable où il se traduit localement par une variation du retard moyen. S'il était de faible amplitude il serait alors possible de le corriger, il faudrait dans ce cas utiliser une lentille divergente afin de conserver la structure du faisceau.

Nous avons procédé à une caractérisation des faisceaux des deux types de laser proposés : un Quantel Brilliant, de 350 mJ sur 5 ns pour le premier type et un laser à modes bloqués, de 100 mJ sur 100 ps, également de la société Quantel. Aux figures B.5.3. et B.5.4. nous présentons les retards à moyen terme mesurés dans les faisceaux de ces deux lasers.

On constate effectivement des biais importants dans le premier laser, allant jusqu'à 3 ns à l'extrémité ($1/e^2$ en intensité). Ces retards sont beaucoup plus faibles dans le second laser : environ 0,15 ns entre le centre et l'extrémité du faisceau, donc un facteur 20 comparé au premier laser. Ces retards ne sont toutefois pas totalement absents car les bords du faisceau voient leur intensité décroître (les pertes sont plus fortes), ce qui s'accompagne donc de retards à la construction de l'impulsion. Nous avons remarqué que les biais sont stationnaires à cette échelle de temps : les figures B.5.3. et B.5.4. montrent que pour deux passages successifs dans le faisceau, les retards se superposent presque partout. Par contre nous avons constaté des dépointages de l'ordre 0,4 mrad (pour le premier laser) ainsi qu'une variation du profil des retards à long terme. Il est donc difficile de modéliser et de corriger cet effet car il n'est pas stationnaire.

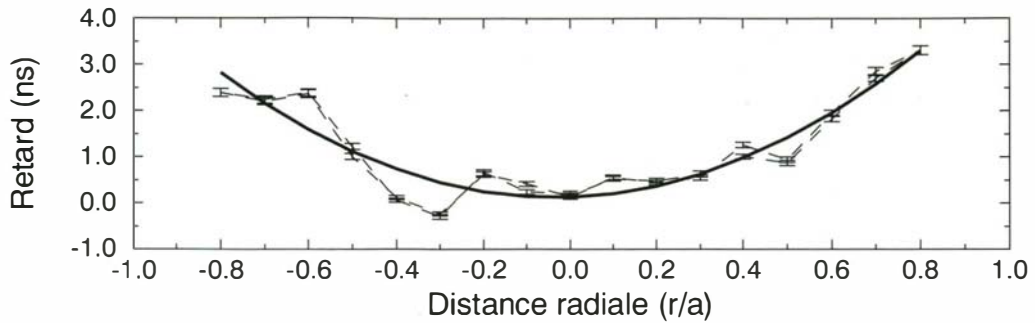


figure B.5.3. : retards mesurés dans le faisceau dans le cas du laser à miroir supergaussien (a = rayon du faisceau)

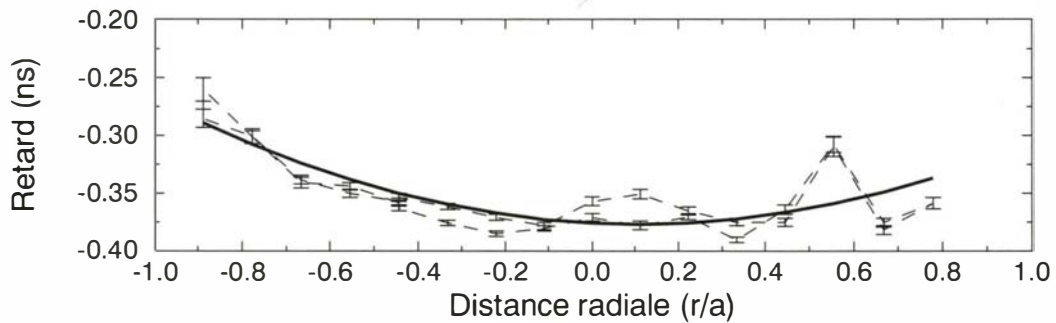


figure B.5.4. : retards mesurés dans le faisceau dans le cas du laser à modes bloqués

Nous pouvons conclure de cette étude qu'un laser à miroir de coefficient variable ne convient pas à notre application à cause des retards systématiques qui dominent largement les autres phénomènes de distorsion. Plus précisément, ce sont les instabilités du faisceau, associées aux retards, qui produisent des erreurs non modélisables. Dans un autre type de cavité où les retards moyens sont absents la stabilité de pointé devient moins importante et comparable aux fluctuations de tir-à-tir.

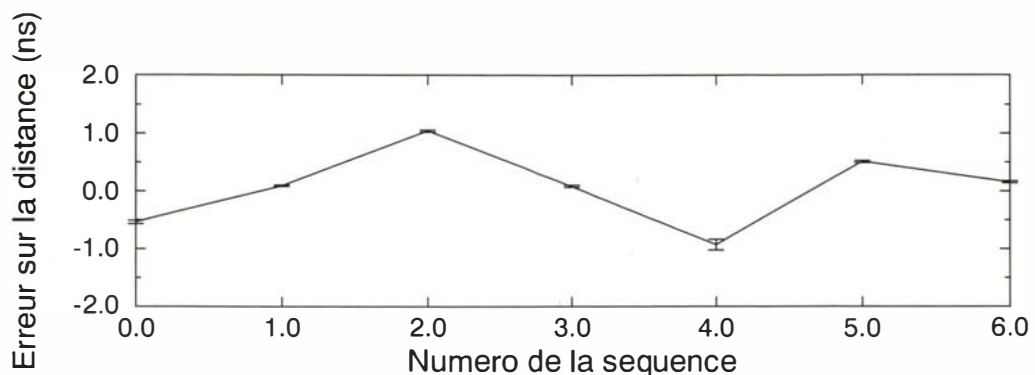


figure B.5.5. : erreur sur la distance dans le cas du laser à miroir supergaussien

Résultats expérimentaux

Nous avons fait un ensemble de mesures de distances sur deux réflecteurs situés à cent mètres du système et séparés d'environ quatorze mètres. Les deux types de laser ont été utilisés à puissance réduite afin de ne pas saturer le détecteur, lui-même monté sans amplificateur, et en garantissant un rapport signal-bruit supérieur à 100. Les distances ont été estimées à l'aide de la méthode de l'intercorrélation.

Dans le cas du laser à miroir supergaussien, la figure B.5.5. présente les distances moyennes de sept séquences de 100 à 450 traces, ainsi que les écarts-type sur ces distances. On note des variations des moyennes de ± 1 ns autour de la valeur exacte et un écart-type en monocoup d'environ 200 ps à comparer aux 17 ps de précision de l'estimateur. Il est clair que le biais d'une séquence correspond à une position particulière des deux réflecteurs dans le faisceau, il peut donc varier de ± 3 ns conformément à la figure B.5.3. Cette variation provient dans notre cas du mouvement des speckles au niveau des réflecteurs dû soit à un déplacement du dépoli soit aux phénomènes à long terme du laser. De même, les fluctuations de tir à tir de la phase du faisceau à la sortie du laser contribuent au mouvement des speckles à court terme et peuvent expliquer la valeur élevée des écarts-type en monocoup. Les écarts-type théoriques sur les moyennes (σ/\sqrt{N}) sont compris entre 9 et 30 ps et sont largement dépassés par les variations réelles des moyennes. Si l'on pouvait s'assurer que tous les biais sont explorés (par exemple par un mouvement continu du dépoli), un moyennage à long terme pourrait donner une valeur exacte, mais avec un écart-type important. Il est donc préférable d'utiliser un autre laser où cet effet est plus faible.

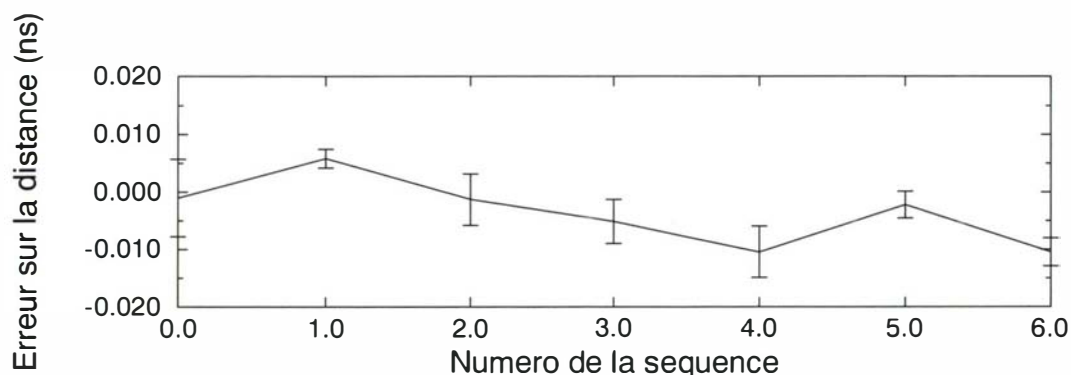


figure B.5.6. : erreur de distance dans le cas du laser à modes bloqués

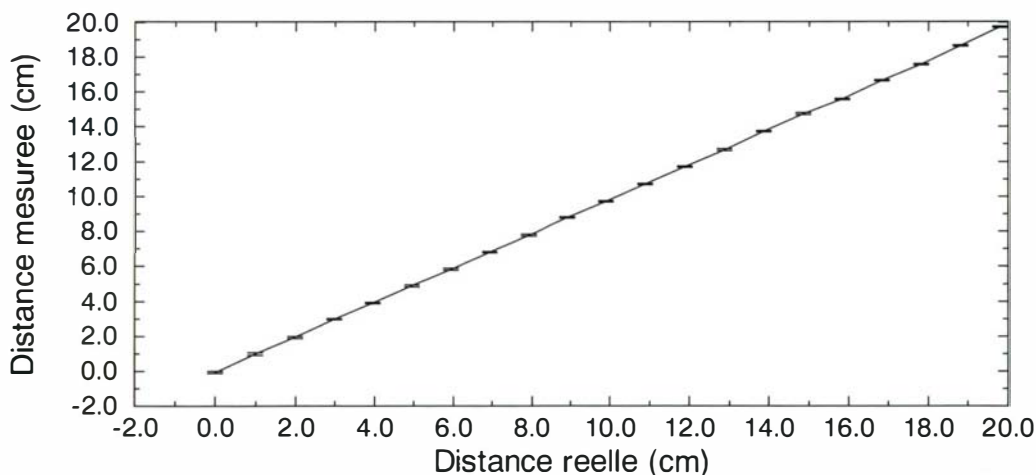


figure B.5.7. : mesure de variations de la distance entre deux réflecteurs avec le laser à modes bloqués

Dans le cas du laser à modes bloqués, figure B.5.6., les distances moyennes (pour des séquences de 100 tirs) varient de ± 10 ps avec des écarts-type inférieurs à 7 ps. L'échelle est réduite d'un facteur 100 par rapport au laser précédent. Les écarts-type en monocoup sont compris entre 22 et 66 ps alors que les rapports signal-bruit correspondants prédisent de 7 à 19 ps pour l'estimateur. Il y a donc un bruit supplémentaire que l'on peut à nouveau attribuer aux instabilités à moyen terme du faisceau. Néanmoins, en considérant la moyenne de ces moyennes nous trouvons la valeur exacte à ± 1 ps avec un écart-type de 2 ps. Nous arrivons également à la limite de précision de l'appareil de référence (AGA 114) et des corrections atmosphériques devraient être prises en compte. Nous pouvons donc considérer que la précision du système, pour un grand nombre de mesures (700) est de 2 ps, soit 0,3 mm. Notons que ce type de laser est couramment utilisé dans des dispositifs de télémétrie sur satellites et que les limites de précision que nous avons mises en évidence peuvent expliquer la grande disparité des résultats observée dans [DEGNAN 93].

Nous avons effectué une autre expérimentation permettant de vérifier la détection de déplacements d'un centimètre d'un réflecteur par rapport à un autre. La figure B.5.7. présente ces résultats, où il apparaît que les déplacements sont détectés à $\pm 0,5$ ps soit 0,075 mm pour des séquences relativement courtes de cent tirs.

Conclusion et perspectives

Nous avons validé l'instrumentation du procédé, dans le cas du laser à modes bloqués générant une impulsion de 100 ps. Il nous reste maintenant à faire une expérimentation réelle afin de valider le processus d'optimisation sur des distances mesurées. Nous prévoyons une première campagne de mesure à bord d'un véhicule terrestre pour le printemps 1995 suivie d'une expérimentation aéroportée au courant de l'année 1995. La première consistera à mesurer le mouvement de réflecteurs sur un glissement de terrain (St Etienne de Tinée). La deuxième aura lieu dans une zone équipée pour l'occasion et dans les conditions réelles, conformément à la figure B.5.1. Après la validation de cette dernière étape, l'industrialisation du procédé pourra être envisagée.

Remerciements

Nous tenons à remercier F. PIERRON, ainsi que toute l'équipe de la Station laser Mobile de l'Observatoire de la Côte d'Azur, pour la mise à disposition et l'installation de leur laser dans notre laboratoire. Ceci nous a permis de réaliser les expérimentations fort utiles que nous avons présentées ici.

Nous remercions également J. PELON et D. BRUNEAU du Service d'Aéronomie du CNRS (U.P.6) pour leurs conseils et leur soutien dans cette entreprise.

Références

- [CAPRARA et al 92] A. Caprara & GC. Reali : *Time-resolved M^2 of nanosecond pulses from a Q-switched variable-reflectivity-mirror Nd :YAG laser*, Optics Letters, vol 17, n° 6, March 1992.
- [DEGNAN 93] JJ. Degnan : *Millimeter Accuracy Satellite laser Ranging : A Review*, Geodynamics Serie, volume 25, Contributions of Space Geodesy to Geodynamics : Technology, 1993.
- [KASSER et al 92] M. Kasser, O. Bellier, Y. Egels, C. Million, Ch. Thom & D. Fourmaintraux : *Etude d'un procédé de télémétrie laser aéroportée sur cible réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol*, rapport IGN SNEA(P) n° 7862, 90 pages, mars 1992.
- [KHAN et al 82] WD. Khan, JJ. D & TS. England : *The Airborne laser Ranging System, Its Capabilities and Applications*, NASA Technical memorandum n° 8394, 27 pages, septembre 1982.
- [MILLON 91] C. Millon : *L'utilisation des mesures saisies en vol en aérotriangulation*, thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, spécialité Géodésie, 245 pages, 1991.
- [McALLISTER et al 70] GL. McAllister, MM. Mann & LG. DeShazer : *Transverse mode distortion in giant-pulse laser oscillators*, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol 6, n° 1, January 1970.

Publications

- [BOCK 94] O. Bock : *Caractérisation du système de télémétrie laser*, IGN, Service de la Recherche, rapport interne au LOEMI, 37 pages, avril 1994.
- [BOCK 94] O. Bock : *Propriétés du faisceau laser dans le système de télémétrie*, IGN, Service de la Recherche, rapport interne au LOEMI, 32 pages, août 1994.
- [BOCK et al 95] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & D. Fourmaintraux : *Development of a new airborne laser subsidence measurement system, siming et mm-accuracy* accepté au Fifth International Symposium on Land Subsidence, 1995.
- [FOURMAINTRAUX et al 94] D. Fourmaintraux, M. Flouzat, MJ. Bouteica & M. Kasser : *Improved subsidence monitoring methods*, Society of Petroleum Engineers, paper 28095, august 1994.

B.6. Modélisation de la géométrie des objets linéaires en vue de leur généralisation automatique

par Corinne PLAZANET

Introduction à la généralisation des objets linéaires

La généralisation peut être vue comme un processus holistique de part le grand nombre de contraintes à prendre en compte [RUAS 94]. Un des principaux problèmes réside dans le fait que chaque objet doit être considéré dans un contexte cartographique particulier, du fait de sa géométrie propre, de son environnement cartographique (présence d'objets voisins et interrelations) et du niveau de généralisation visé. Nous allons donc être amenés, dans le cadre d'un processus de généralisation automatique, à formaliser un grand nombre de contraintes cartographiques qui interviennent dans un tel processus.

Le sujet abordé est restreint à la généralisation cartographique des objets linéaires. Cela consiste schématiquement à sélectionner les objets à retenir à l'échelle visée, à simplifier les caractères géométriques non pertinents des objets retenus et en amplifier les formes géométriques importantes, puis à déplacer ces objets sans détériorer les formes locales et globales, et finalement à harmoniser l'aspect global, notamment en gérant les conflits intervenant entre objets voisins [LE MEN 93]. Nous traitons ici des manipulations géométriques (simplification, amplification) sur des objets linéaires (notamment des routes), indépendamment des autres objets.

Un cartographe qui généralise manuellement a une perception globale et continue de la ligne. Il utilise pleinement son sens artistique et esthétique et son expérience personnelle. La plupart du temps, la connaissance qu'il utilise pour généraliser n'est pas formalisée. A quel moment décide-t-il de supprimer un virage afin d'éviter qu'il se retrouve de l'autre côté du thalweg par exemple? Quelles sont les catégories de connaissances qui guident le cartographe à prendre les "bonnes" décisions de généralisation? Nous sommes à même d'ores et déjà, en regardant la manière de faire des cartographes, de formaliser des règles de base :

- respecter les formes géométriques locales et globales des objets,
- préserver la topologie intrinsèque des objets,
- rendre en compte la largeur du symbole,
- prendre en compte la nature sémantique des objets.

Lors des changements d'échelle, il convient de ne pas détériorer le message cartographique que porte chaque objet. Ce message peut provenir à la fois de la nature sémantique de l'objet et de sa géométrie propre. Selon le thème de la carte, le message aura une influence plus ou moins grande sur le processus de généralisation. Par exemple, si un virage dangereux se trouve sur une route mollement sinueuse, il faudra conserver cette information (surtout dans le cas d'une carte routière), même si l'empâtement du virage est inférieur à la largeur du signe conventionnel [WEGER 94]. Inversement supprimer un virage sur une route fortement sinueuse aura une incidence moins importante sur le message intrinsèque porté par la route. Ces notions d'environnement de formes géométriques et de résolution sont essentielles. L'aspect contextuel de la généralisation des formes géométriques, souvent lié à l'aspect non formulé des décisions prises par le cartographe, est particulièrement difficile à modéliser.

Parmi les algorithmes de généralisation développés, nombreux sont ceux qui concernent la simplification ou le lissage de lignes : les algorithmes de Douglas (très utilisé), de Lang, de Thapa, de Jenks, de Brophy etc Cependant, d'après divers auteurs [Beard 91], [Buttenfield 91], [Jenks 89], [Mc Master 89], ces algorithmes sont complexes à appliquer pour tous les types de lignes, même par des experts en généralisation. Effectivement, des séquences complexes d'opérations de généralisation doivent être mises en oeuvre telles que la simplification, le lissage, la caricature avec des réglages délicats de valeurs de paramètres pour chaque étape.

La figure B.6.1 présente respectivement de gauche à droite : une route BDCarto (figure B.6.1a), une généralisation manuelle au 1 : 250 000 (figure B.6.1b) et le résultat d'une simplification suivie d'un léger lissage (figure B.6.1c). Cet exemple montre que l'utilisation de l'algorithme de Douglas produit un tracé trop anguleux et inesthétique, et amène rapidement à une dégradation de la topologie de l'arc. La forme Φ porte un message important pour la route, elle doit donc être conservée et amplifiée lors de la généralisation. Avec l'algorithme de Douglas, elle a été maintenue, mais doit cependant subir une amplification à l'image de la généralisation manuelle.

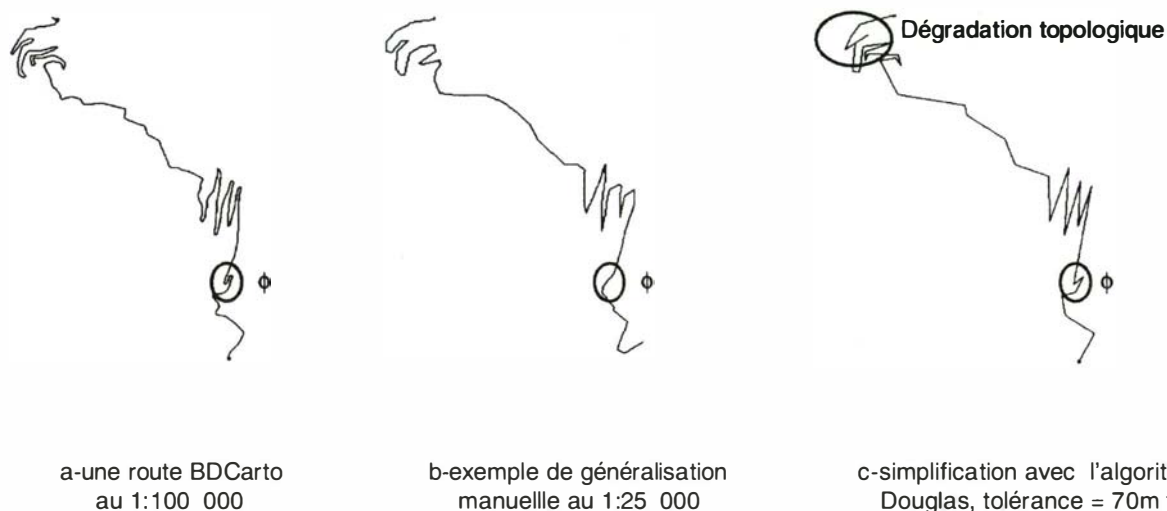


figure B.6.1 : Comparaison d'une généralisation manuelle et d'une généralisation automatique à l'aide de l'algorithme de simplification de Douglas

De telles considérations mettent clairement en évidence la nécessité de décrire la géométrie des objets préalablement à toute opération de généralisation. Partageant des objectifs similaires aux approches de B. Buttenfield [BUTTENFIELD 91] et de RB. Mc Master [Mc MASTER 93], nous présentons dans cet article un modèle descriptif basé sur un découpage hiérarchique des lignes en sections homogènes. Chaque section est classifiée de manière à appliquer les algorithmes de généralisation les mieux appropriés et les valeurs de paramètres adéquates [PLAZANET 95].

Description de la géométrie des objets linéaires

On considère différentes formes d'une ligne à différents niveaux de perception, allant d'un niveau global (la ligne directrice) à un niveau local (un virage). Deux critères nous permettent de décrire une ligne : la sinuosité et l'homogénéité.

- On définit de façon simple la sinuosité d'une ligne par ces nombreux changements de direction à différents niveaux de perception. Cependant il faut "complexifier" cette définition en détaillant différentes facettes de la sinuosité comme par exemple les formes locales des virages (sinusoïdes, spirales...), la symétrie des virages, ou encore la sinuosité de la ligne directrice à un niveau plus global etc

- On définit l'homogénéité d'une ligne par le fait qu'elle contienne ou non des portions cohérentes par rapport à la sinuosité (voir figure B.6.2). Une telle ligne pourra être découpée selon ce critère pour un niveau de perception particulier. La définition de l'homogénéité d'une ligne peut varier selon le niveau d'analyse : ainsi une section issue d'une segmentation à un niveau donné (donc potentiellement homogène à ce niveau d'analyse) pourra subir une nouvelle segmentation à un niveau plus local.

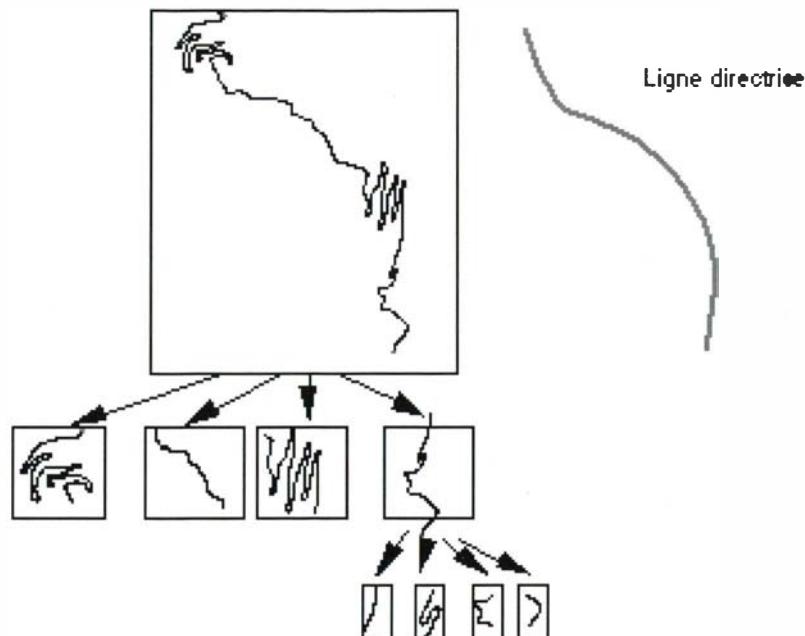


figure B.6.2 : Un exemple de segmentation (sur une route BD Carto)

Ces critères peuvent s'avérer insuffisants pour décrire les lignes de manière objective et exhaustive. Nous les considérons cependant comme primordiaux. Ils sont à la base des concepts sur lesquels est construit le processus de description proposé dans ce papier.

Processus de description

L'homogénéité constitue le premier critère de description. A chaque niveau de perception, la ligne (ou une section de ligne) est segmentée si elle est considérée comme étant inhomogène. Le processus consiste ainsi à examiner de manière récursive les sections de ligne. À chaque pas, si la section considérée s'avère inhomogène elle est segmentée à son tour, sinon elle est analysée dans le but d'une classification plus détaillée.

Le modèle hiérarchique ainsi construit par le biais d'une analyse descendante a pour résultat un arbre de description (figure B.6.3). Chaque nœud de l'arbre correspond à une section de ligne et comporte des attributs descriptifs. La transition entre un nœud et un nœud fils peut être une segmentation ou une analyse. La racine de l'arbre correspond à la ligne originale. Plus un nœud est bas dans l'arbre, plus l'analyse correspondante est détaillée. L'homogénéité au premier niveau est qualifiée de manière grossière, alors que les feuilles peuvent correspondre à des sections plus finement homogènes qui comportent un attribut de classe de forme pouvant correspondre à un type de virage particulier (un virage est ici défini comme une portion de courbe dont la courbure ne change pas de signe et est délimitée par deux points d'inflexion, pour le niveau d'analyse considéré).

L'arbre descriptif ainsi construit peut alors être analysé de manière à déduire des informations complémentaires nécessaires aux décisions de généralisation, telles que, par exemple, les niveaux relatifs des formes dans les formes. Cette seconde étape est donc plutôt "ascendante".

Le processus pratique utilisé

Bien que restant flous et pouvant être considérés selon différents points de vue, les critères de description cités ci-dessus sont complexes à modéliser. Cependant, nous avons tenté quelques expérimentations à partir d'une première définition :

Soit $IP(\lambda)$ l'ensemble des points d'inflexion détectés pour un niveau d'analyse donné λ , et soit $M(IP(\lambda))$ la moyenne des distances $d(IP_i, IP_{i+1})$ entre les points d'inflexion consécutifs.

Soit $\Delta(IP(\lambda))$ les séquences de déviation $D_i = d(IP_i, IP_{i+1}) - M(IP(\lambda))$. En fait, nous retenons uniquement les signes S_i de ces D_i . S'il existe un point d'inflexion IP_i tel que $S_{i-2} = S_{i-1}$ et S_i soit différent de S_{i-1} , alors IP_i est un lieu de segmentation potentielle. Les points d'inflexion entre lesquels les inter-distances varient de façon significative sont retenus comme points critiques. Ces points critiques définissent la segmentation de la ligne (figure B.6.4).

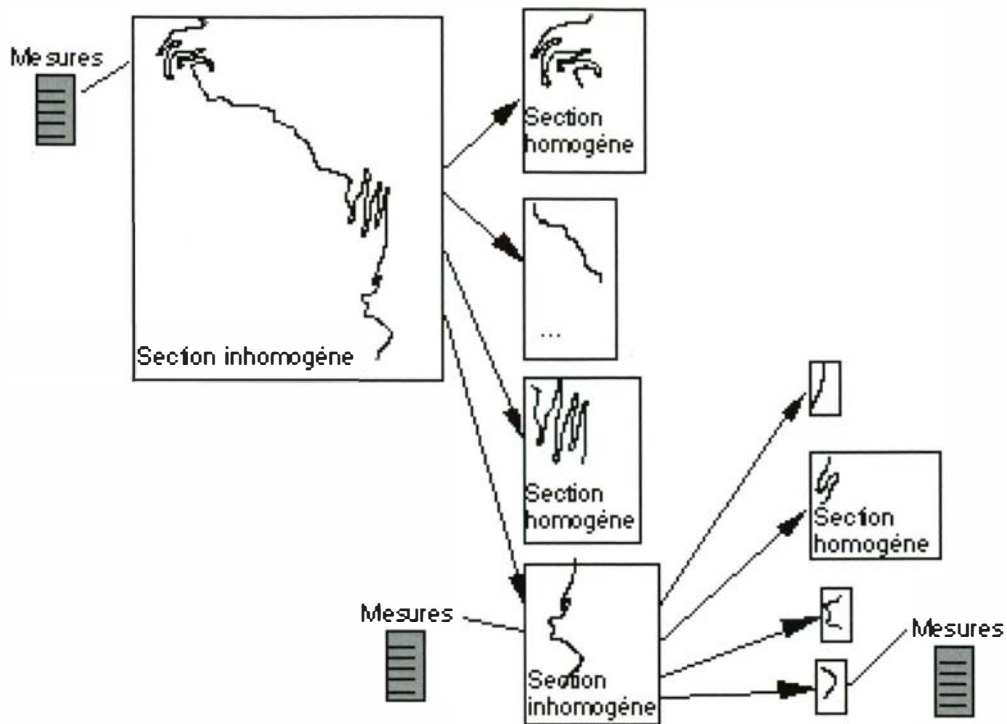


figure B.6.3 Une description hiérarchique de ligne : découpage en sections

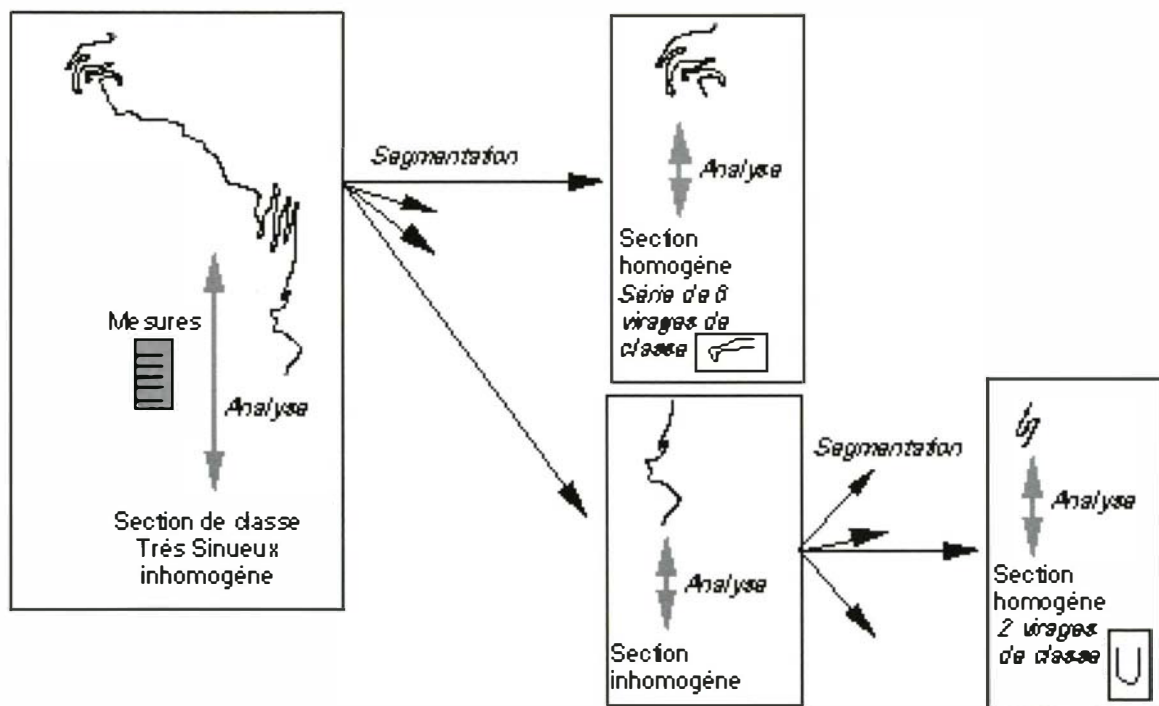
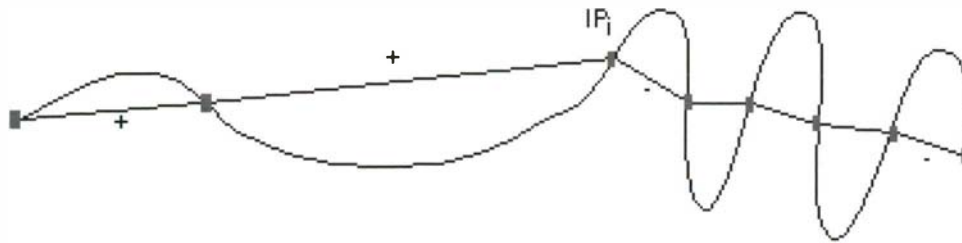


figure B.6.4 Une description hiérarchique de ligne : segmentation

Pour la classification de la sinuosité, nous considérons une approche "constructive". A partir d'un ensemble de mesures calculées sur une série de sections homogènes (pour un niveau d'analyse donné λ), nous classons ces sections en classes de formes. En effet, une telle classification peut prendre en compte non seulement un critère de sinuosité, mais également d'autres critères. Les mesures sont choisies de manière à représenter les premières facettes de la sinuosité. Pour chaque virage défini comme une portion de courbe entre deux points d'inflexion consécutifs (figure B.6.5), sont calculés :

- la distance euclidienne base entre les points d'inflexion,
- la hauteur h du triangle (S_i, IP_i, IP_{i+1}) ,
- la longueur curviligne l entre les points d'inflexion IP_i et IP_{i+1} ,
- le ratio l/base entre la longueur curviligne et la distance euclidienne de IP_i à IP_{i+1} ,
- le ratio h/base entre la hauteur et la distance euclidienne de IP_i à IP_{i+1} .



IP_i est un point d'inflexion et M est la moyenne des distances IP_i-IP_{i+1}
 si $d(IP_{i-1}, IP_i) - M > 0$ $d(IP_{i+1}, IP_i) - M < 0$ IP_i est un point critique

figure B.6.5 : détermination des points critiques

Pour la classification de la sinuosité, nous considérons une approche "constructive". A partir d'un ensemble de mesures calculées sur une série de sections homogènes (pour un niveau d'analyse donné l), nous classifions ces sections en classes de formes. En effet, une telle classification peut prendre en compte non seulement un critère de sinuosité, mais également d'autres critères. Les mesures sont choisies de manière à représenter les premières facettes de la sinuosité. Pour chaque virage défini comme une portion de courbe entre deux points d'inflexion consécutifs (figure B.6.5), sont calculés :

- la distance euclidienne base entre les points d'inflexion,
- la hauteur h du triangle (S_i, IP_i, IP_{i+1}),
- la longueur curviligne l entre les points d'inflexion IP_i et IP_{i+1} ,
- le ratio l/base entre la longueur curviligne et la distance euclidienne de IP_i à IP_{i+1} ,
- le ratio h/base entre la hauteur et la distance euclidienne de IP_i à IP_{i+1} .

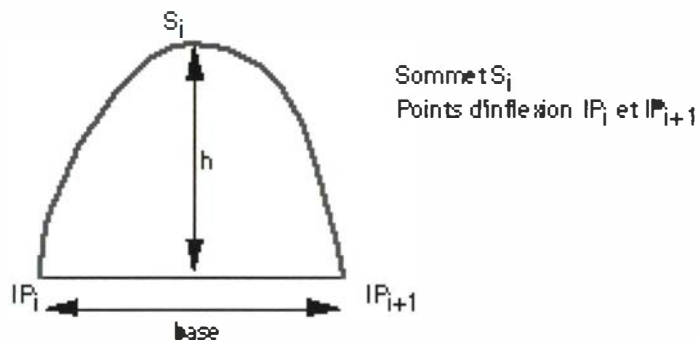


figure B.6.6 : mesures effectuées sur un virage

Pour une section donnée, les valeurs moyennes ou médianes sont calculées pour toutes ces mesures et ainsi utilisées dans un processus classique de classification hiérarchique.

Un arbre de description est construit du niveau global vers le détail, fondé sur une segmentation récursive et une classification. Les points d'inflexion sont détectés sur une ligne préalablement lissée au moyen d'une convolution avec un filtre gaussien de paramètre σ . La progression dans l'analyse est assurée par le réglage de la détermination des points d'inflexion : plus le niveau d'analyse est bas dans l'arbre, plus la valeur de σ est faible. Une série de plus en plus détaillée de points d'inflexion est ainsi à la base des opérations de segmentation et de classification de la sinuosité. La valeur de σ est adaptée automatiquement; on choisit empiriquement une loi $L \times \ln(L)$ où L est la longueur curviligne de la section considérée.

Notons le fait que les séries de mesures considérées pour évaluer les critères ne fournissent pas en l'état une vue exhaustive de ceux-ci. Il semble clair, au vu des expériences, que l'homogénéité ne se limite pas aux inter-distances entre points d'inflexion. Une des premières améliorations envisagées consisterait à ajouter de nouvelles mesures (telles que la hauteur h des virages, figure B.6.6) et à décomposer le critère d'homogénéité selon plusieurs aspects. Ces critères peuvent alors être pris en compte successivement à plusieurs niveaux d'analyse. Une étape supplémentaire souhaitable consisterait à concevoir une formalisation globale intégrant plusieurs facettes de l'homogénéité. Cependant, à la lumière des expérimentations déjà réalisées, nous pensons qu'en prenant en compte séquentiellement différentes mesures d'homogénéité, nous devrions raisonnablement obtenir des résultats probants.

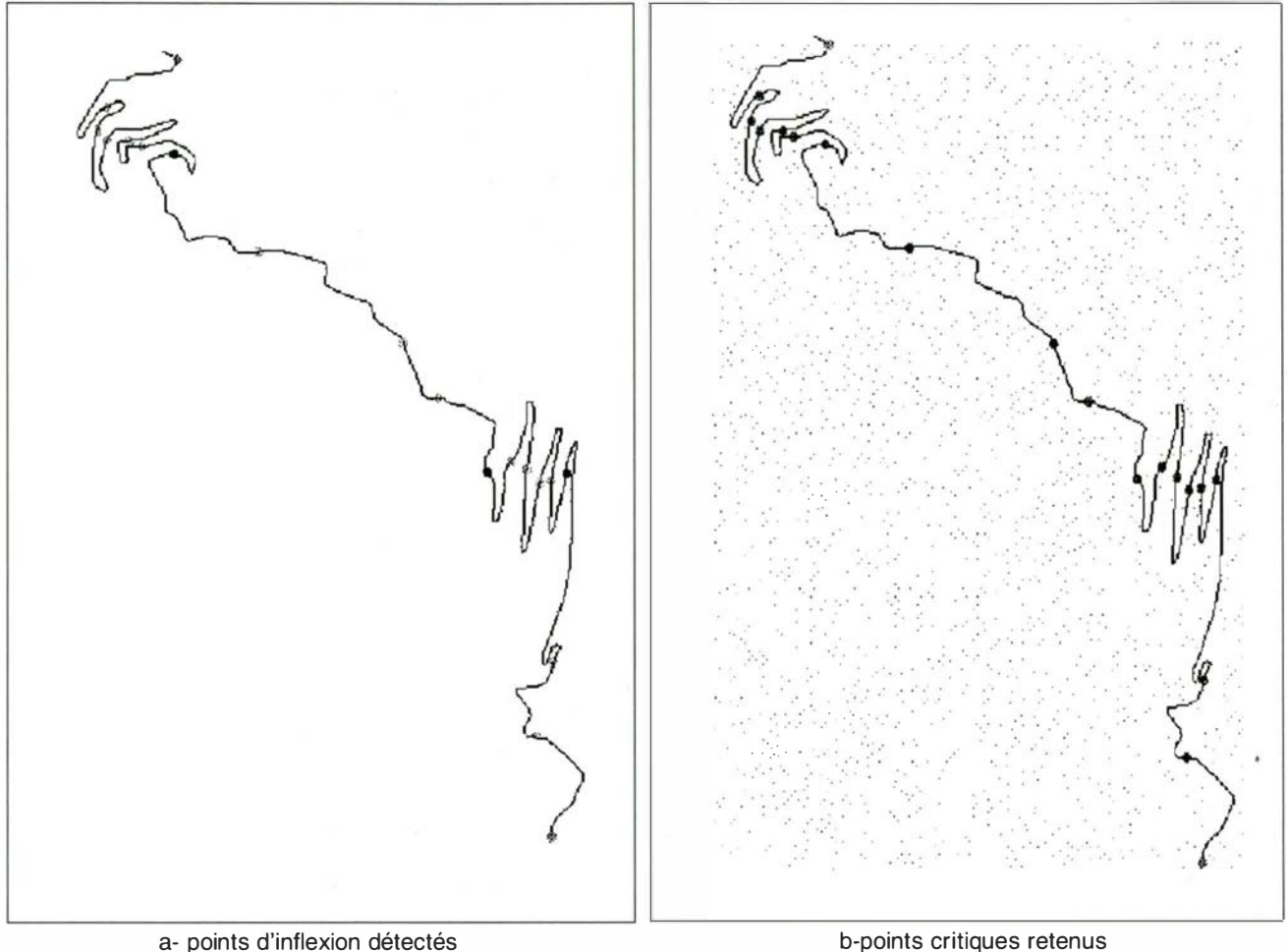
De même, la classification selon la sinuosité est déterminée à partir d'un ensemble restreint de mesures. Le principal problème réside dans le fait que différents types de formes (d'un point de vue perceptuel) produisent des valeurs très proches (voir figure B.6.8), la section S1 de la ligne en haut à gauche comparée à la section S3. Il est possible de calculer un grand nombre de mesures à partir de la représentation proposée ou également à partir des mesures déjà proposées dans la littérature ([Mc Master 86], [Buttenfield 91], [Plazanet 95]). Le problème consiste à choisir un sous-ensemble approprié pour chacune des tâches du processus et à différents niveaux d'analyse, qui soient normalisées et non corrélées.

Notons cependant que l'ensemble limité de mesures utilisé pour cette première expérience a conduit à des résultats encourageants.

Résultats expérimentaux

Une partie du processus de description a été expérimentée sur un ensemble de routes de la BD Carto IGN, à partir des mesures décrites ci-dessus. Le premier objectif consiste à segmenter les lignes en portions rectilignes/sinueuses /fortement sinueuses.

Segmentation : Les premières expérimentations montrent que même avec un critère d'homogénéité unique, l'étude des variations permet de déterminer un premier niveau de sections homogènes. Dans l'exemple figure B.6.6, les virages dans la première section sinueuse (en haut à gauche) sont très serrés et fermés sur eux-mêmes, alors dans la section sinueuse du milieu, ils sont plus réguliers et sinusoïdaux. Une analyse plus détaillée de chaque section est nécessaire pour distinguer ces caractéristiques géométriques différentes.



a- points d'inflexion détectés

b-points critiques retenus

figure B.6.7 : une exemple de segmentation de lignes

Classification des sections homogènes : Pour une première expérimentation, les mesures choisies à partir de l'ensemble des mesures décrites sont : la médiane du ratio $l/base$ et la médiane du ratio $h/base$. Un ensemble de quarante lignes ont été segmentées puis les sections classifiées en utilisant les fonctions de "cluster analysis" du logiciel S-PLUS. Les résultats montrent quelques problèmes, mais fournissent cependant un premier niveau de classification significatif (voir figure B.6.8).

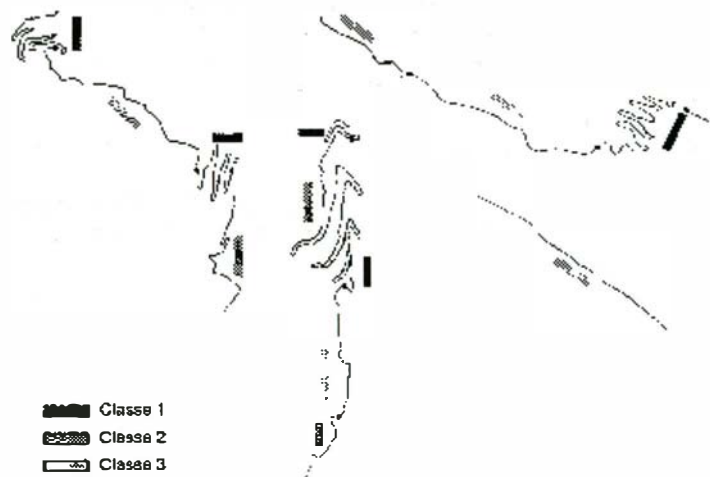


figure B.6.8 : un exemple de clasification

Intérêts pour la généralisation

A partir de l'arbre de description d'une ligne, une analyse remontante (qui n'a pas encore été intégrée dans les expérimentations déjà réalisées) devrait nous permettre de déduire des informations complémentaires de manière à guider les choix d'opérations de généralisation à appliquer localement. Cette connaissance peut être formalisée sous la forme de règles cartographiques simples telles que par exemple, pour un virage particulier :

- *règle 1* : si la distance entre les points d'inflexion est plus petite que la largeur du symbole, alors un conflit interne est détecté,
- *règle 2* : si le virage est une forme isolée dans une section très faiblement sinueuse, alors le virage considéré est un virage important qui doit être conservé,
- *règle 3* : un virage est important et crée un conflit interne, il doit être amplifié.

Le processus de segmentation et d'analyse actuellement expérimenté n'est pas encore lié aux algorithmes de généralisation, mais plutôt à la perception visuelle. Pour progresser vers les objectifs fixés dans le cadre de la généralisation automatique, nous devons résoudre divers problèmes :

- Définir quels sont les algorithmes de généralisation adaptés aux différents types de lignes. Ainsi une fois que l'on a déterminé la classe d'appartenance d'une ligne ou d'une portion de ligne, le choix de l'algorithme (ou de la séquence d'algorithmes) le mieux adapté et des valeurs de tolérance sont implicites. Ce problème met l'accent sur un problème critique qui est l'évaluation et la compréhension des effets des algorithmes de généralisation sur les objets linéaires;

- Concevoir une méthode pour segmenter et analyser les lignes, similaire à celle décrite dans ce papier, mais orientée vers une classification "opérationnelle" (i.e. liée aux algorithmes de généralisation). Néanmoins, le processus actuel de segmentation et de classification nous permet déjà d'adapter dans certains cas des choix cohérents d'algorithmes et de valeurs de tolérance. Sur les résultats obtenus, on peut distinguer les classes de sections de lignes "quasiment rectilignes" des portions "mollement sinueuses" et des portions "très sinueuses", de telle sorte que par exemple nous savons où appliquer correctement l'algorithme de Douglas, avec des valeurs de tolérance adaptées au type de sinuosité.

De plus, le problème de la validation des résultats de généralisation introduit en particulier le problème de l'évaluation de la qualité en termes de conservation de formes. Une utilisation potentielle de l'arbre de description pourrait consister à comparer les deux arbres correspondant à deux versions d'une ligne (originale et généralisée), facilitant ainsi la comparaison.

Publications

- [LE MEN 93] H. Le Men : *Généralisation et bases de données*, IGN, Direction Technique, rapport interne, 1993.
[PLAZANET et al 94] C. Plazanet, JG Affholder, JPh. Lagrange & A Ruas : *Représentation et analyse de formes linéaires pour l'automatisation de la généralisation cartographique*, EGIS'94, vol. II, pp. 1112-1121, 1994.
[PLAZANET 95] C. Plazanet : *Measurements, characterisation and classification for automated linear features generalisation*, 1995.
[RUAS 88] A. Ruas : *Automatic line generalization using zero-crossings*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54-4, pp. 511-517, 1988.
[WEGER 94] G. Weger : *Cours de cartographie*, IGN, document interne, 1994.

Références

- [BEARD 91] K. Beard : *Theory of the cartographic line revisited*, in Cartographica 28(4), pp. 32-58, 1991.
[BUTTENFIELD 91] B. Buttenfield : *A rule for describing line feature geometry*, in Map Generalization, Chapter 3, pp. 150-171, Buttenfield and McMaster Ed. Longman Scientific & Technical, London (GB), 1991.
[JENKS 89] GF. Jenks : *Geographic logic in line generalisation*, in Cartographica, pp. 27-42, 1989.
[Mc MASTER 86] RB. McMaster : *A statistical analysis of mathematical measures for linear simplification*, in The American Cartographer 13(2), pp.103-117, 1986.
[Mc MASTER 89] RB. McMaster : *The integration of simplification and smoothing algorithms in line generalization*, in Cartographica 26, pp.101-121, 1989.
[Mc MASTER 93] RB. McMaster : *Knowledge Acquisition for Cartographic Generalization : Experimental Methods*, ESF GISDATA Work, Compiègne (F), décembre 1993, To appear in "GIS and Generalization : Methodological and Practical issues" Taylor & Francis, London (GB), 1993.

B.7. Prototype de SGBD Orienté-Objet pour l'information géographique : bilan d'expérience

par Laurent RAYNAL

Une expérimentation a débuté en 1991 à l'IGN au laboratoire COGIT dont l'objectif consistait à évaluer le potentiel de la technologie orienté-objet pour la manipulation et la modélisation d'informations géographiques. Sur le plan pratique, un prototype a été développé au-dessus du système de gestion de base de données (SGBD) Orienté-Objet O₂ de la Société O₂ Technology à l'aide du langage spécifique O₂ C. Ce prototype a été appelé GéO₂. Cet article relate les expériences les plus marquantes qui ont été menées à ce stade de développement. Deux sujets de recherche principaux en ont été extraits et forment la structure de cet article. En premier lieu, des tests de performances ont été réalisés pour le chargement, pour la visualisation et pour l'accès à des lots de données importants. Puis une analyse quant à la standardisation et la portabilité des développements actuels a été engagée par le truchement d'un portage de GéO₂ dans un autre environnement : le SGBD Orienté-Objet Versant et le langage C++.

Introduction

L'IGN est amené à gérer des volumes de données importants. Par exemple, un lot de données de la BD Topo couvrant une superficie de 20 x 28 km représente déjà un volume d'information de plus de soixante Mega-octets. De plus, cet extrait ne représente qu'un millième de la superficie totale de la France.

Or les données localisées sont complexes, combinant composantes géométriques et caractéristiques sémantiques. Si la gestion des caractéristiques sémantiques peut être confiée à un SGBD relationnel, la gestion des composantes géométriques (points, lignes, polygones) requiert l'intégration de notions géographiques (référentiel, projection, coordonnées) et souvent l'ajout de notions topologiques (relation de proximité entre les objets). Enfin, les données localisées nécessitent des traitements complexes et intensifs qui sollicitent beaucoup les possibilités des calculateurs. L'affichage des données d'une carte avec une légende en est d'ailleurs un exemple simple (ordre d'affichage, définition de la légende en fonction de l'échelle, nombre important de points à afficher...).

Devant de tels besoins, il apparaît que les SGBD relationnels standard ne sont pas aptes à gérer efficacement les données localisées [FRANK 84]. On ne peut pas ajouter les structures de données localisées (graphes de points, lignes, surfaces, index spatiaux). Il est donc absolument nécessaire de se doter d'un SGBD extensible. Les SGBD Orienté-Objet semblent satisfaire de tels besoins car on bénéficie des fonctionnalités de la programmation Orienté-Objet (l'identité d'objet, l'héritage de propriétés, la définition de méthodes associées aux types). Ainsi, les structures de données localisées peuvent être implantées aisément. Cependant, l'intégration des notions géographiques dans le SGBD ne doit pas pour autant pénaliser l'utilisateur dans l'emploi quotidien du système (performances insuffisantes, temps de réponse trop long), surtout lors de la manipulation de gros volumes de données.

C'est pourquoi une expérience a débuté en 1991 à l'IGN au laboratoire COGIT dont l'objectif consistait à évaluer le potentiel de la technologie orienté-objet pour la manipulation et la modélisation d'informations géographiques. Sur le plan pratique, un prototype, baptisé GéO₂ [DAVID et al 93], a été développé au-dessus du SGBD Orienté-Objet O₂ [O2 91] de la Société O₂ Technology, en O₂ C (langage de programmation proche du langage C). Cet article relate les expériences les plus marquantes qui ont été menées jusqu'à présent et les enseignements qui en ont été tirés.

En premier lieu, des tests de performances ont été réalisés pour le chargement, pour la visualisation et pour l'accès à des lots de données importants. Puis une analyse quant à la portabilité des développements actuels a été engagée par le truchement d'un portage de GéO₂ dans un autre environnement : le SGBD Orienté-Objet Versant et le langage C++. Notons que les autres travaux et études (le modèle des données générique de GéO₂ [DAVID et al 93], le module de superposition [SCHORTER et al 94], les tests d'appariement entre les tronçons de route de la BD Carto et de la BD Topo [STRICHER 93] et le modèle de gestion de l'historique [LATARGET 94]) ne seront pas relatés dans cet article.

Tests de performances

Trois types de tests ont été envisagés : ils portent sur l'indexation, la visualisation et le chargement des objets géographiques.

Indexation d'objets géographiques

L'interrogation d'une base de données géographique se fait dans la plupart des cas selon des critères de localisation (sélection des objets présents à un endroit donné, sélection des objets inclus dans une zone donnée). Or l'extraction de données géographiques suivant des critères de localisation peut engendrer des traitements importants, et longs pénalisant l'utilisateur dans l'usage du logiciel. Aussi des mécanismes spécifiques pour accéder rapidement aux données doivent être ajoutés. Un index spatial remplit cette fonction en instaurant un ordonnancement logique entre les données géographiques (et chaque requête comportant des critères de localisation tirera partie de cet ordonnancement logique pour accélérer la résolution de la requête).

Pour tester plusieurs types d'index spatiaux, une hiérarchie entre classes a été constituée; une classe générique appelée SpatialIndex est introduite sur laquelle quatre fonctions (ou méthodes) sont définies :

- insert () : pour insérer un objet dans l'index (indexer un objet),
- delete () : pour retirer un objet de l'index,
- locate () : pour rechercher tous les objets situés en un point donné,
- search () : pour rechercher tous les objets intersectant un rectangle donné.

Puis plusieurs index ont été développés (un R*-Tree [BECKMANN et al 90], un Quadtree [SAMET 89] et un Point-Quadtree [SAMET 89]), chacun correspondant à une sous-classe de la classe SpatialIndex (figure B.7.1.). Les quatre méthodes sont redéfinies pour chacune de ces sous-classes. Ainsi, cela permet de comparer le comportement des index suivant leur implémentation ou suivant les requêtes (pointé, fenêtrage, taille de la fenêtre).

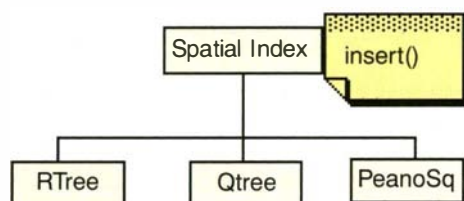


figure B.7.1. : hiérarchie des classes pour les index spatiaux

Comportement des index suivant leur implémentation : Par exemple, pour la construction de l'index R*-Tree, trois approches ont été envisagées :

- (i) soit l'index est entièrement développé dans O_2 avec une configuration standard,
- (ii) soit l'index est entièrement développé dans O_2 mais avec une configuration adaptée au jeu de données (augmentation de la mémoire pour les processus),
- (iii) soit l'index est développé en C stockant l'index dans un fichier Unix (avant de le transférer dans O_2).

Les expériences ont montré que l'adaptation de la configuration (solution ii) pouvait permettre un gain d'environ 50% par rapport à la configuration standard. Cependant l'utilisation du fichier Unix (solution iii) a nettement dépassé une telle adaptation en réduisant le temps de chargement d'un facteur proche de cinq par rapport à la configuration standard. Il apparaît donc que les mécanismes d'allocations génériques, qui sont invoqués pour le développement au dessus d' O_2 entraînent un certain nombre d'indirections et s'avèrent peu performants. Il faut donc que l'index spatial soit placé au cœur du SGBD avec des fonctionnalités certes moins évoluées mais permettant une allocation de place beaucoup plus rapide pour l'index; c'est d'ailleurs la voie suivie par O_2 Technology.

Comportement des index suivant les requêtes : Après plusieurs expérimentations sur différents jeux de données (réseau routier, occupation du sol, courbes de niveaux), des performances très variables ont été constatées qui s'expliquent à la fois par la variété des jeux de données en terme de densité, de taille et également par la répartition "aléatoire" des données sur disque. En effet, l'utilisation d'un index spatial s'avère d'autant plus utile quand le regroupement des données sur disque respecte l'ordonnancement instauré par l'index. Et les performances des index peuvent être fortement dégradées dans le cas contraire. C'est pourquoi aucune conclusion n'a pu être tirée quant à la comparaison des index spatiaux entre eux à l'issue de cette expérience. Cependant, l'évolution du SGBD O_2 avec la fonctionnalité de regroupement de données sur disque (proposée dans sa dernière version) devrait permettre d'estimer plus précisément le comportement des index.

Visualisation des données

La visualisation des données est une fonctionnalité essentielle pour la manipulation des données géographiques. Aussi, comme O_2 ne proposait pas une telle fonctionnalité en 1991, une interface graphique pour des données vecteur 2D a été développée en O_2 C (utilisant directement des fonctions de la Xlib). Or des problèmes de rapidité d'affichage des lignes nous ont amené à nous interroger sur les moyens de stockage des lignes.

En effet, il est apparu que l'implémentation des lignes sous la forme classique d'une liste de points (en utilisant le constructeur liste de O_2) conduisait à de faibles performances, car cette structuration ne permettait pas un stockage contigu des coordonnées des points. Aussi, une autre structuration a été proposée, qui consiste à représenter une ligne sous la forme d'un tableau de points assurant ainsi une contiguïté de stockage pour les coordonnées des points. Ce type de constructeur n'étant pas fourni par O_2 , il a donc été implémenté à l'aide d'une structure C (insérée dans O_2 comme une suite de bits). Et cette méthode s'avère cinq fois plus rapide que la première. Cette seconde méthode permet notamment d'avoir un temps d'affichage constant (entre 0,6 et 0,9 secondes pour cent lignes) quel que soit le nombre de points par lignes.

Cette expérience met donc en évidence le besoin d'un constructeur tableau pour la manipulation d'informations géographiques. Ce constructeur doit assurer la contiguïté de stockage pour des valeurs non-atomiques (tel que le couple de coordonnées X,Y), ce qui n'est pas possible avec O_2 en O_2 C, ni avec un autre SGBDOO en C++. Pourtant, les critères de performances exigent cela d'un SIG-OO.

Chargement des données géographiques

L'IGN, en tant que producteur de données géographiques, a conçu et développé un Format d'Echange Interne au format Vecteur, appelé FEIV. Aussi, pour $GéO_2$, il a paru tout à fait naturel de développer un module de chargement des données géographiques à partir des fichiers FEIV. Cependant, chaque jeu de données possède un schéma de données et des données en accord avec le schéma. Le chargement d'un jeu de données consiste alors dans un premier temps à transcrire le schéma de données décrit dans les fichiers FEIV en un schéma de données compatible pour le système cible puis à charger les données sur le système cible. Cette tâche s'avère pénible s'il n'est pas possible d'extraire automatiquement le schéma de données, et longue car l'extraction des données géométriques sollicite les capacités des ordinateurs.

Le module générique de chargement de données de $GéO_2$ essaie de remédier à ces deux inconvénients car il transcrit automatiquement le schéma de données décrit dans les fichiers FEIV en un schéma de données sous O_2 (le modèle de données de $GéO_2$ sert à ce titre de pivot pour la transcription) et assure un découpage du chargement des données en plusieurs transactions (allongeant le temps de chargement mais réduisant la charge de l'ordinateur).

La transcription du schéma ajoute dynamiquement sous O_2 les nouvelles classes correspondant au schéma de données illustrant l'intégration souple de la gestion du schéma combinée à la manipulation des objets. En comparaison, l'instanciation du méta-schéma et sa dérivation en un schéma de données n'est pas aussi aisée dans un SGBD relationnel. Le SGBDOO apporte donc ici une plus grande flexibilité.

Pour le chargement des données, des tests ont été entrepris pour un lot BDTopo qui comprend 95 000 nœuds, 115 000 lignes et 37 000 polygones. Le chargement d'un tel volume de données requiert en moyenne 25 heures (comme pour un SIG). Ce chargement ne peut pas être réalisé en une seule transaction avec O_2 du fait d'une limitation de la taille mémoire. D'un point de vue base de données, c'est ici un cas où le mécanisme de transactions longues aurait été utile. Or celui-ci n'étant pas disponible, nous avons simulé cette procédure en segmentant le chargement en plusieurs étapes : une étape pour les données sémantiques, une étape tous les 5 000 nœuds, une étape tous les 2 500 arcs, une étape toutes les 5 000 faces et enfin une dernière étape pour relier les données sémantiques aux données géométriques.

Cette expérience nous a montré la nécessité des transactions longues pour le chargement de gros volumes de données. En termes de performances, le temps de chargement semble être fortement dépendant du temps de construction de l'index spatial (thème abordé précédemment) et du temps de construction de la topologie (l'algorithme peut certainement être optimisé).

Conclusions - perspectives

De ces premiers tests, il découle que le SGBDOO est une bonne plateforme pour implémenter un système d'informations géographiques (généricité des mécanismes, facilité de développement) mais que la fonctionnalité d'extensibilité proposée au niveau des classes (ajout de types-utilisateurs, de méthodes) doit être étendue au niveau des mécanismes d'accès (tableau, index spatiaux). Il faut donc doter le SGBDOO d'une interface de plus bas niveau (s'adressant directement aux modules de stockage des objets) afin de répondre à ces besoins. A ce titre, on peut noter que le produit O_2 semble évoluer dans cette voie.

Enfin, concernant les futurs tests de performances, deux sujets phares semblent se dégager :

- la gestion des transactions longues qui s'avèrent nécessaires dans le cadre de processus lourds (chargement de gros volumes de données) ou dans le cas de mise-à-jour de données géographiques,

- l'intégration des index spatiaux au cœur du système qui sera utilisée pour le regroupement des données sur disque et pour l'optimisation du langage de requêtes (plan d'exécution faisant appel à l'index).

Afin de tester la portabilité des développements sur un autre SGBDOO de type "C++ persistant", le portage de GéO₂ en C++, sur le SGBDOO Versant a été décidé en 1993. Au début, une traduction automatique d'O₂C vers C++ était envisagée, mais il s'est avéré que cela n'était pas réalisable pour une application si complexe et importante (plus de 90 classes, 650 méthodes). Il a donc été décidé de réécrire GéO₂ en C++ de façon manuelle [CUZON, GRELOT 93]. Ainsi, trois niveaux de traduction nous sont apparus :

Le premier niveau correspond à la traduction syntaxique usuelle, substituant chaque groupe de mots-clés en un autre groupe de mots-clés (déclaration des classes, déclaration des types).

Le second niveau dépend beaucoup plus du contexte. Il s'agit de choisir les fonctionnalités proposées dans l'environnement C++/Versant (notion de dictionnaire...) que l'on met en correspondance avec des fonctionnalités proposées dans l'environnement O₂C/O₂. Cette correspondance modifie légèrement la signification du code. Par exemple, en ce qui concerne les éléments passés en paramètre, les notions d'objet et de référence d'objet peuvent être distinguées en C++ tandis qu'en O₂C seule la notion de référence d'objet peut être utilisée ; il faudra donc faire un choix de transcription pour le C++.

Enfin, le troisième et dernier niveau correspond aux incohérences flagrantes entre O₂/O₂C et Versant/C++, principalement pour la gestion de l'héritage et de la persistance. Ces facteurs nécessitent même de reconcevoir des parties de l'application et nous ont empêchés de finir et valider le portage. Détaillons donc ces points.

Gestion de l'héritage

Pour illustrer l'incompatibilité entre les deux langages dans la gestion de l'héritage, nous nous appuyons sur un exemple : considérons les classes SimpPoly et CompPoly (figure B.7.2.) qui désignent respectivement les polygones simples et les polygones complexes (polygones simples avec trous). Dans l'implémentation initiale (en O₂C), l'héritage entre ces deux classes permet de réutiliser la méthode geom et de la sous-typer (le mécanisme d'héritage par sous-typage permet de faire cela). En revanche, en C++, il n'est pas possible de réutiliser une méthode et de la sous-typer (c'est une contrainte du mécanisme d'héritage du C++, appelé surcharge : si on modifie la signature, il faut donner une "nouvelle" implémentation). Aussi, il est nécessaire de laisser inchangée la signature de la méthode et d'ajouter des instructions de transformation de type à chaque utilisation de la méthode (figure B.7.2.).

en O ₂ C		en C++
<pre> class SimpPoly ... method geom : SimpPoly, ... end class </pre>	<i>se traduit en</i>	<pre> class SimpPoly {... virtual SimpPoly & geom () ; ... } </pre>
<pre> class CompPoly inherit SimpPoly ... method geom : CompPoly, ... end class </pre>	<i>ne peut se traduire en</i>	<pre> class CompPoly : virtual public SimpPoly {... CompPoly & geom () ; ... } </pre>
	<i>se traduit en</i>	<pre> class CompPoly : virtual public SimpPoly {... SimpPoly & geom () ; ... } </pre>

figure B.7.2. : transcription d'O₂C en C++

En fait, ces incompatibilités proviennent de l'interprétation de la notion d'héritage.

- En O₂C, l'héritage est perçu soit comme un moyen de généraliser plusieurs sous-classes, c'est-à-dire comme la factorisation des comportements et structures communes à un ensemble de classes (la classe SpatialIndex généralise les classes RTree, PeanoSq et QTree), soit comme un moyen de spécialiser une classe, c'est-à-dire comme le raffinement d'un type par l'ajout de structures et la redéfinition du comportement (le point 3D (X,Y,Z) est une spécialisation du point 2D (X,Y)). C'est une interprétation en accord avec les notions de généralisation sémantique, spécialisation sémantique qui sont décrites dans les modèles conceptuels. Le sous-typage est donc une transcription directe des notions du modèle conceptuel.

- En revanche, en C++, l'héritage est perçu comme un moyen de partager ou de réutiliser le code des programmes. A priori, le partage du code correspond à la généralisation sémantique et la réutilisation du code correspond à la spécialisation. Mais, comme le mécanisme d'héritage du langage C++ repose systématiquement sur la surcharge, c'est-à-dire la redéfinition de toutes les méthodes pour une sous-classe, il peut y avoir incompatibilité quand il y a combinaison des notions de polymorphisme et sous-typage (pour la méthode geom dans la classe CompPoly, on veut conserver le fait que geom correspond à la même méthode que dans SimpPoly (notion de polymorphisme) et qu'elle renvoie un CompPoly (notion de sous-typage). De plus, si la réutilisation de code par héritage optimise la conception, cela se fait au détriment de l'évolution. En effet, la relation d'héritage tend à figer les classes entre elles car une modification devient compliquée (il faut s'assurer qu'il n'y a pas de propagation abusive de la modification par la relation d'héritage). On constate donc que la surcharge est l'expression d'une technique de programmation et non la transcription d'une modélisation conceptuelle. Et cela est la source des conflits d'héritage détectés lors du portage.

Gestion de la persistance

Le second point critique concerne la gestion de la persistance. La persistance est la propriété de faire survivre les données à l'exécution d'un programme pour un temps arbitraire (aussi longtemps ou aussi brièvement qu'il est nécessaire). L'environnement O₂/O₂C propose une persistance par atteignabilité tandis que l'environnement Versant/C++ propose une persistance explicite.

- S'il y a persistance par atteignabilité, les objets sont considérés par défaut comme persistants, et ceux qui ne peuvent plus être atteints à partir des racines de persistance sont détruits automatiquement. Le programmeur n'a donc pas à donner d'ordres explicites pour rendre les objets persistants. Cette solution est la plus attrayante pour le programmeur mais souffre de problèmes d'efficacité. En effet, la suppression automatique des objets confiée au système dégrade les performances. C'est donc un très bon environnement de prototypage.

- S'il y a persistance explicite, le programmeur doit ajouter des commandes spécifiques pour rendre les objets persistants. Dès lors pour chaque création d'objet, il faut décider s'il est temporaire ou persistant. Deux systèmes d'allocations existent simultanément et le passage de l'un à l'autre (de temporaire à persistant), engendre une duplication de l'objet et une efficacité moindre. Aussi, une programmation sur un tel système nécessite de distinguer (et de dupliquer si besoin est) les méthodes manipulant des objets persistants et celles manipulant des objets temporaires. C'est donc une tâche contraignante pour le programmeur mais c'est l'environnement actuel pour le développement industriel. Cette configuration est cependant fragile car elle est la combinaison de deux paradigmes (langage et SGBD) et de ce fait très dépendante de leurs évolutions.

Conclusion(s)

Le portage de GéO₂ dans l'environnement Versant/C++ est une tâche difficile qui tend à remettre en cause à la fois l'environnement de développement et les développements eux-mêmes. Ainsi, deux types de problèmes ont été soulevés :

- tout d'abord, on constate une fluctuation sensible dans l'interprétation et la transcription des concepts dans les langages de programmation (notion d'héritage). Cela ne remet pas en cause les investissements réalisés quant à la définition du modèle conceptuel de GéO₂ mais différencie les réalisations de ce même modèle selon les configurations. Aussi, pour mener à bien une transcription directe d'un langage à un autre, une inspection minutieuse de chaque corps de fonction devient nécessaire, le modèle O₂C restant néanmoins le modèle le plus proche des modèles conceptuels,

- ensuite, on constate une différence dans la gestion de la persistance. La persistance par atteignabilité a l'avantage de faciliter les développements rapides (prototypage) mais aussi l'inconvénient de ne pas pouvoir être utilisé en production (processus contraignant pour la suppression des objets). A contrario, la persistance explicite a l'avantage d'être actuellement une technique de production (développement en grandeur réelle) mais aussi l'inconvénient d'être très rigide et ne facilite pas les tests ponctuels.

Or notre tâche, en tant que centre de recherches, ne consiste pas à développer des logiciels industriels mais bien à explorer et tester différentes approches pour pouvoir proposer des solutions aux problèmes de gestion des données géographiques. Notre travail s'inscrit donc dans la voie du prototypage, c'est-à-dire avec les systèmes gérant la persistance par atteignabilité. De plus, comme l'O₂C reste un langage très proche des notions conceptuelles (donc très proche des spécifications), l'environnement O₂/O₂C nous semble tout-à-fait adéquat pour les recherches à venir.

Conclusion

L'objectif de GéO₂ consistait à évaluer le potentiel de la technologie orienté-objet pour la manipulation et la modélisation d'informations géographiques. Un modèle de données générique a été élaboré [DAVID et al 93]. Puis des tests de performances ont été réalisés pour le chargement, pour la visualisation et pour l'accès à des lots de données importants. Il en découle que les SGBD Orienté-Objet sont une bonne plateforme pour implémenter un système d'informations géographiques (généricité des mécanismes, facilité de développement) mais que la fonctionnalité d'extensibilité proposée au niveau des classes (ajout de types-utilisateurs, de méthodes) doit être étendue au niveau des mécanismes d'accès (tableau, index spatiaux) pour des raisons de performances. Il faut donc doter le SGBDOO d'une interface de plus bas niveau (s'adressant directement aux modules de stockage des objets) afin de répondre à ces besoins. Le produit O₂ semble évoluer dans cette voie.

Puis une analyse quant à la portabilité des développements actuels a été engagée par le truchement d'un portage de GéO₂ dans un autre environnement : le SGBD Orienté-Objet Versant et le langage C++. Cette tâche difficile tend à remettre en cause à la fois l'environnement de développement et les développements eux-mêmes. Or malgré une fluctuation sensible dans l'interprétation et la transcription des concepts dans les langages de programmation (notion d'héritage), les investissements réalisés quant à la définition du modèle conceptuel de GéO₂ ne sont pas remis en cause. De plus, si la gestion de la persistance est traitée de deux manières différentes, il apparaît que la méthode choisie par O₂ (gestion de la persistance par atteignabilité) facilite les développements, ce qui correspond à notre objectif en tant que centre de recherche.

Aussi, GéO₂ (avec O₂ et le langage O₂C) devient donc le support sur lequel vont se greffer les recherches à venir. Il s'agit de la conception d'une base de données multi-échelles, de la modélisation de gestion de l'historique des données et de la modélisation de la précision de localisation.

Publications

[CUZON, GRELOT 93] A. Cuzon & C. Grelot : *Portage d'un système d'informations géographiques en O₂C sur un gérant d'objets compatible C++*, rapport de stage DESS SCHM, Université Paris-Sud Orsay, 1993.

[DAVID 93] B. David, L. Raynal, G. Schorter & V. Mansart : *Why objects in a geographical DBMS?*,

[LATARGET 94] S. Latarget : *Un modèle orienté-objet pour la gestion de l'historique des bases de données géographiques*, rapport de stage DEA-SIG, Université Paris-7 - Marne la Vallée (F), 1994.

[SCHORTER et al 94] G. Schorter; L. Raynal & F. Vauglin : *GéO₂ : Module de Superposition*, Les Journées de la Recherche CASSINI, Lyon (F), pp. 251-261, 1994.

[STRICHER 93] N. Stricher : *Base de données multi-échelles : Association géométrique entre la BD Carto et la BDTopo par mesure de la distance de Hausdorff*, rapport de stage DESS SCHM, Université Paris-Sud Orsay (F), 1993.

Références

[BECKMANN ET AL 90] N. Beckmann, HP. Kriegel, R. Schneider & B. Seeger : *The R*-Tree : An efficient and robust access method for points and rectangles*, in Proc. ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp. 322-331, 1990. *Advances in Spatial Databases*, LNCS 692, Springer-Verlag, pp. 264-276, 1993.

[FRANK 84] A. Frank : *Requirements for database systems suitable to manage large spatial databases*, Proc of First International Symposium on Spatial Data Handling, pp. 38-60, 1984.

[O2 91] O₂ : *The O₂ System*, Communications of the ACM, vol. 34, n° 10, 1991.

[SAMET 89] H. Samet : *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*, Addison-Wesley Reading, MA (USA), 1989.

C.

Bilan des actions de recherche

C.1.

IMAGE ET PHOTOGRAMMÉTRIE

C.1.1.

Introduction

par Daniel PIQUET-PELLORCE

On trouvera ci-après six axes de recherche, ce qui peut sembler beaucoup pour une équipe d'une quinzaine de personnes. Ceci traduit sans doute le champ très ouvert que représente l'interprétation automatique des données numériques et la pression qu'exercent les besoins de la production dans le cadre des espérances mises dans la photogrammétrie tout numérique.

Cette année aura vu la soutenance de deux thèses donnant lieu à deux publications un peu plus développées en tête de ce bulletin. L'une concerne la lecture automatique des cartes scannées par Marc Pierrot Deseilligny où l'essentiel de la problématique a été abordé, permettant de structurer le travail pour aboutir à moyen terme sur des propositions de production. L'autre, soutenue par Tuan Dang et dont le compte rendu a été rédigé par Olivier Dissard, concerne la détection et la restitution du bâti de grandes dimensions à partir des photographies aériennes. Si cette thèse a permis de défricher et expérimenter un certain nombre d'idées, elle a mis évidence les difficultés de l'extraction du bâti dont l'automatisation ne peut être envisagée à court terme. Par contre, il est possible que des avancées significatives puissent se faire dans le cadre d'une approche semi-automatique.

Le thème important de la restitution automatique du relief, intimement mêlé à la modélisation numérique du terrain, est le plus ancien et, sans aucun doute, celui qui a atteint la plus grande maturité, celui où l'on peut parler de méthode, de résultats et d'évaluation. Toutefois, si on peut vraisemblablement faire passer des résultats en développement au profit de la production, des chantiers importants demeurent ouverts concernant : - sursol et MNT, - la corrélation par ensemble (ou facette) et non plus ponctuelle dont les principes sont exposés plus longuement par Patrick Julien - la prise en compte des lignes caractéristiques (crêtes et thalwegs) dans la modélisation numérique du terrain pour laquelle l'exposé d'Olivier Jamet apporte une bonne contribution, la définition même de la qualité d'un MNT restant à approfondir.

L'extraction du réseau routier, elle aussi, a atteint une certaine maturité, et le passage en développement d'aide à la saisie interactive peut être envisagé. Si elle demande plus de développements informatiques et des liens plus étroits avec la production, l'extraction semi-automatique constitue une bonne approche des problèmes tant pour les algorithmes de reconnaissance que pour ceux de restitution; toutefois de nombreux aspects d'ergonomie et d'efficacité des solutions ne pourront être réellement vus que dans le cadre du développement. L'approche de l'automatisme intégral pose le problème de système d'interprétation assez complet de l'image et de la scène, ceci est sans doute vrai quelque soit le thème étudié. Pour aborder ce problème difficile, trois thèses sont en cours, dont deux sollicitent l'apport de l'information structurée, détenue par ailleurs (cartes scannées et bases de données). Ceci conduit vers des systèmes assez complexes dont l'efficacité ne peut être attendue avant plusieurs années.

Enfin, l'étude des aspects relatifs à la qualité, conduite par Philippe Hottier est essentielle pour mieux définir les contraintes des diverses recherches et leur évaluation. Bien entendu cette préoccupation est présente au sein même des travaux en cours.

Pour l'année 1995, il a été proposé de réorganiser les axes de recherche entre applications semi-automatiques à court et moyen terme d'une part, recherches plus conceptuelles sur les systèmes d'interprétation et la conception d'algorithmes à moyen et long terme d'autre part; la lecture automatique de cartes scannées constituant un ensemble à part pouvant déboucher à moyen terme.

C.1.2.1. Introduction

par Patrick JULIEN

Le thème "Restitution du relief" regroupe les recherches qui concernent l'élaboration des modèles numériques de terrain (MNT). L'action "Fabrication de MNT avec le corrélateur DAUPHIN" et l'action "Évaluation des MNT issus de la corrélation" étaient les plus urgentes à mener.

- La première a débouché sur la réalisation d'un corrélateur "élargi" en ce sens qu'il intègre les traitements préliminaires et postérieurs au strict traitement de corrélation; chaque chercheur du laboratoire peut maintenant, à l'aide cet outil, réaliser facilement lui-même les MNT dont il a besoin.

- La deuxième, relative à l'évaluation, commence à recourir à des méthodes élaborées de mesure d'erreurs; elle donne déjà des indications encourageantes sur la qualité des MNT produits, au moins en terrain favorable (pas trop accidenté ou boisé).

Les actions "Recherche de méthodes de lissage" et "Élimination du sur-sol isolé" sont plus orientées vers l'objectif principal actuel de l'ensemble du thème de recherche, à savoir restituer les courbes de niveau de la BD Topo.

- Le lissage, capable en outre de préserver les lignes caractéristiques du terrain, est en effet indispensable pour pouvoir dériver d'un MNT une planche de courbes de niveau à la fois lisible, et correcte aux yeux du topographe.

- L'action concernant le sur-sol isolé en est encore à son début, mais montre déjà qu'une proportion significative d'éléments du sur-sol sont décelables dans un MNT en provenance directe du corrélateur (MNT "brut").

Il convient de préciser que les quatre actions précitées se rapportent implicitement au relief en paysage naturel (rural). La restitution du relief en paysage artificiel (urbain) nécessite des méthodes d'attaque nouvelles, qui impliquent notamment de reconnaître les détails topographiques. Ce sera le rôle de la toute récente action "Systèmes d'analyse d'images aériennes appliqué à la restitution du relief" de concevoir ces méthodes.

Enfin, de l'action "Parallélisation de la corrélation automatique", maintenant parvenue à son terme, on retiendra une proposition d'architecture de machine adaptée.

C.1.2.2. Élimination du sur-sol isolé

par Philippe GUIAVARC'H, Olivier DISSARD et Olivier JAMET

Contexte - objectifs

Les méthodes de calcul du relief par corrélation automatique de couples stéréoscopiques d'images produisent des modèles numériques de terrain des parties vues, incluant tous les éléments du sur-sol (couverture végétale, bâtiments...) qui ne correspondent donc pas à la surface topographique réelle du terrain. Pour produire des altitudes au sol, il convient d'éliminer les surfaces correspondantes au sur-sol dans le MNT calculé. Les altitudes manquantes seront alors déterminées par interpolation pour les zones de faible taille. L'objectif de cette recherche se limitait initialement à la détection du sur-sol par recherche des excroissances dans le MNT. Quelques techniques d'analyse de photographies numérisées ont été également abordées.

Activité - résultats

L'activité principale a porté sur la détection sur MNT. Différentes méthodes ont été testées : recherche des extrêmes locaux, méthode de morphologie mathématique (opérateur de type chapeau haut de forme), utilisation d'une fenêtre érosive glissant sur le MNT, utilisation d'une barre érosive de largeur et de hauteur paramétrables se déplaçant sur le MNT.

Afin de comparer les résultats des différents tests, une méthode d'évaluation de la détection a été mise au point. Il s'agit de se fabriquer une référence du sursol interactivement, en saisissant visuellement, conjointement sur image et sur MNT, les éléments formant le sursol et apparaissant sur le MNT.

A titre indicatif la méthode par barre érosive sur un terrain à faible dénivelé présentant de l'habitat dispersé ainsi que des petites zones boisées donne une détection de 68% du sursol, pour une sur-détection représentant 35% de la détection.

En ce qui concerne les techniques d'analyse d'image, on s'est intéressé à la reconnaissance des textures pouvant caractériser la végétation ou l'habitat.

Dans le cadre de la thèse de Rémi Mayer, dirigée par le Pr. Georges Stamon (Université René Descartes), la caractérisation par des paramètres calculés sur des matrices de co-occurrences a été abordée. Sur un échantillon restreint de zone rurale (photographie aérienne panchromatique à l'échelle du 1 : 30 000, numérisée au pas de 20 μm), les zones texturées apparaissent correctement séparées des zones homogènes, mais la distinction entre le bâti et la forêt semble difficile. Des méthodes de segmentation hiérarchique basées sur un critère d'homogénéité fonction de la dispersion des radiométries ont donné des résultats similaires. La faiblesse de l'échantillon ne permet toutefois pas de tirer des conclusions péremptives (les zones bâties ne correspondaient qu'à quelques villages). La fin de la thèse est orientée vers les outils de segmentation. La soutenance est prévue dans le courant de l'année 1995.

Par ailleurs, quelques tests ont été faits sur la caractérisation des textures par la direction du gradient des radiométries de l'image (Olivier Dissard). La dispersion locale des directions du gradient semble être un bon indicateur de l'organisation du milieu (milieu naturel : forte dispersion; milieu artificiel : dispersion faible). Sur un échantillon d'image aérienne de la région de Reims présentant de l'habitat pavillonnaire et des forêts, les deux textures sont grossièrement séparables par seuillage d'un indicateur local de dispersion calculé sur les histogrammes locaux des directions du gradient. Ce type de caractérisation doit cependant être améliorée pour être utilisable. Le choix du seuil définissant les différents milieux (urbain, forêts, mixte) reste très sensible, et la délimitation des milieux homogènes encore grossière.

Conclusion

La détection sur MNT reste pour l'instant la seule à présenter un intérêt opérationnel à court terme. Une évaluation complète du gain en qualité ne peut être faite que sur le résultat final (ré-interpolation et calcul de courbes de niveau aux spécifications BDTopo). Celle-ci sera effectuée dans le cadre de l'étude préalable conduite en production pour l'utilisation de la corrélation automatique par la BDTopo.

C.1.2.3. Parallélisation de la corrélation automatique

par Patrick JULIEN

Contexte et objectifs

Cette action a été menée dans le cadre d'une thèse maintenant parvenue à son terme.

Elle se proposait initialement d'adapter un corrélateur automatique séquentiel pour le faire fonctionner sur une machine parallèle.

En l'occurrence, le corrélateur était DAUPHIN, développé à l'IGN, et la machine parallèle SYMPATI2 (SYstème MultiProcesseur Adapté au Traitement d'Image), développée au CEA.

Comme cette action visait à valoriser à la fois les savoir-faire du CEA et de l'IGN, la thèse était co-financée par les deux organismes.

Activités

La difficulté du problème abordé est que SYMPATI2 et DAUPHIN ont des fonctionnements incompatibles.

En effet SYMPATI2 est une machine d'architecture "SIMD" (Single Instruction, Multiple Data), ce qui veut dire qu'elle est constituée de N (ici 32 à 128) processeurs élémentaires qui obéissent tous à la même unité de contrôle, et exécutent donc tous la même instruction à la fois.

Quant à DAUPHIN, il présente entre autres les caractéristiques suivantes :

- la taille de la fenêtre de corrélation dépend du pixel traité,
- le traitement d'un pixel nécessite un prédicteur, donc dépend des appariements voisins déjà obtenus,
- les appariements déjà acceptés peuvent à tout moment être rejetés.

Cela implique notamment que le parcours du corrélateur dans les images est imprévisible.

On voit que ces caractéristiques sont tout le contraire d'un traitement unique appliqué à plusieurs pixels à la fois, et s'opposent aussi à une exploration systématique de l'image.

En 1994, troisième année de la thèse, deux méthodes ont donc été étudiées :

- 1^{er} méthode. Utiliser SYMPAT12 uniquement pour calculer des fonctions de corrélation, sans utiliser de prédicteurs et sans traitement de validation. L'absence de prédicteur oblige à calculer les fonctions de corrélation sur un large domaine de recherche, donc à faire beaucoup de calculs inutiles. Au total, on n'abaisse pas sensiblement le temps de calcul observé sur le processeur hôte seul (sans SYMPAT12).

- 2^{ème} méthode. Lancer simultanément N exemplaires du corrélateur (un par processeur élémentaire), effectuant le même traitement, sur N lignes de l'image. Le temps de calcul observé est inférieur (facteur 4) à celui observé sur le processeur hôte seul. Mais il est bien supérieur à celui observé sur une station de travail récente (facteur 20 par rapport à SUN Sparc-10); cela est dû en partie à ce que SYMPAT12 n'effectue pas lui-même les calculs flottants, mais les sous-traite au processeur hôte.

On doit donc admettre que les diverses tentatives faites pour adapter le corrélateur à la machine n'ont pas été concluantes.

L'idée naturelle est alors de proposer une nouvelle machine, mieux adaptée au corrélateur.

Cette machine devrait être d'architecture "multi-SIMD", c'est-à-dire qu'elle serait composée de plusieurs structures SIMD obéissant à la même unité de contrôle, et partageant certaines données; chaque structure comporterait plusieurs processeurs élémentaires (avec calcul flottant) et commanderait un corrélateur indépendant.

Il resterait, pour justifier encore plus l'étude d'une telle machine, à mettre en évidence son utilité pour les applications de traitement d'image autres que la corrélation.

Suites

Aucune suite n'est envisagée actuellement.

C.1.2.4. Fabrication de MNT avec le corrélateur DAUPHIN

par Philippe GUIAVARC'H

Contexte - objectifs

Le but de cette étude était de mettre en place au laboratoire MATIS une chaîne photogrammétrique regroupant tous les processus nécessaires au calcul de modèles numériques de terrain à partir d'images aériennes numériques (mise en place de couple stéréoscopique (avec orientation interne et relative automatique), ré-échantillonnage des images en géométrie épipolaire, corrélation automatique (avec la version ponctuelle du corrélateur DAUPHIN), lissage par la grille élastique, calcul du MNT) dans un environnement convivial et simple d'utilisation.

Les besoins principaux que cette chaîne s'est attachée à satisfaire étaient d'une part de donner à l'utilisateur un grand choix d'options, allant de l'automatisme complet à une définition rigoureuse de tous les facteurs entrant en jeu, aussi bien dans les opérations de définition des travaux, que dans celle de consultation; et d'autre part de gérer tous les éléments intervenant (images, paramètres et zones de calcul...).

Description

La chaîne développée sous MOTIF permet de travailler dans un environnement multi-utilisateurs. Toutes les informations contenues dans la base de données commune (chambres de prise de vues, fichiers de points d'appuis, mise en place des couples, photographies, images brutes...), ainsi que le contenu de toutes les bases de travail (chantiers, couples, les images calculées (couple d'images épipolaire, images de parallaxes, images de coefficient de corrélation, images des parallaxes lissées, modèles numérique de terrain) ainsi que leurs zones et leurs paramètres de calcul...) sont accessibles par tous les utilisateurs à tout moment.

Différentes possibilités s'offrent à l'utilisateur pour définir chaque étape de son travail aussi bien en ce qui concerne les zones de calcul (entrée interactive des coordonnées, dessin d'une fenêtre directement sur image à l'écran, ou par défaut choix de la zone la plus grande possible), que les paramétrages (entrée interactive de tous les paramètres, en s'inspirant des paramètres proposés, ou l'utilisation d'un jeu de paramètres préalablement définis).

Afin de pouvoir gérer au mieux son espace disque, une distinction est faite entre existence physique et existence sémantique d'une image (dans le premier cas l'image est définie dans la base et son fichier image existe, dans le second cas le fichier image n'existe pas, mais l'image étant définie dans la base elle peut être recalculée à tout moment).

Conclusion

L'interface mise en place est actuellement opérationnelle et permet aux chercheurs et aux stagiaires de manipuler les données photogrammétriques de façon autonome.

La chaîne dans son état actuel n'est pas du tout figée, car d'autres fonctions peuvent y être facilement intégrées. De plus toutes les données, photogrammétriques et autres, peuvent être aisément utilisées dans d'autres applications à travers une bibliothèque de sous programmes permettant d'accéder à la base de donnée.

Publications

[GUIAVARC'H 93] Ph. Guiavarc'h : *Etude d'une chaîne de corrélation numérique*, rapport d'étude préalable, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, 1993.

[GUIAVARC'H 93] Ph. Guiavarc'h : *Etude d'une chaîne de corrélation numérique*, rapport de définition détaillée, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, 1993.

[GUIAVARC'H 93] Ph. Guiavarc'h : *Etude d'une chaîne de corrélation numérique*, rapport UFSI, IGN, 1993.

[GUIAVARC'H 94] Ph. Guiavarc'h : *Etude d'une chaîne de corrélation numérique*, notice utilisateur, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, 1994.

C.1.2.5. Evaluation de la qualité d'un MNT issu de la corrélation automatique de photographies aériennes

par Edouard BEAUVILLAIN

Contexte

Dans le cadre de l'aide à la saisie de la BDTopo, il est important de définir des processus automatiques d'extraction du relief. Cette étude fait suite aux travaux qui avaient été réalisés sur la qualité des MNT [BEAUVILLAIN 93]. L'objectif principal est de mettre au point des méthodes de calcul et de contrôle des courbes de niveau issues de MNT obtenus par corrélation automatique afin que celles-ci vérifient les spécifications de la BB Topo.

Activités

Une synthèse des activités faites sur ce thème est présentée dans [BEAUVILLAIN, JAMET 94].

A partir de photographies aériennes, on cherche à reconstituer le relief en dérivant un jeu de courbes de niveau d'un MNT; la méthode d'obtention du MNT (corrélation automatique ponctuelle) est celle mentionnée au § C.1.2.4.

Différents types de lissages du MNT "brut" obtenu sont ensuite utilisés : en effet, le MNT comporte beaucoup trop de détails (bruit de corrélation) pour une représentation cartographique classique. Les lissages envisagés sont soit l'utilisation d'un filtre passe-bas, soit une généralisation du relief préservant les lignes caractéristiques (crêtes et thalwegs).

Afin de contrôler le respect des spécifications de la base de données topographiques, la méthode consiste à utiliser les principaux objets de la BD Topo (ayant une valeur altimétrique particulièrement significative) comme jeu de référence. Pour cela, on a superposé ces objets (courbes de niveau, routes, cours d'eau, points cotés) aux MNT et évalué les écarts altimétriques.

Les résultats ont montré les difficultés que l'on rencontre sur les zones de sursol (présence de forêts principalement). Par contre, sur les zones sans sursol, les écarts altimétriques restent acceptables et l'influence du lissage est plus nette (cf. § C.1.2.6).

Conclusion

Cette expérience (exposée lors du symposium SFPT-RSS) a permis de mettre en évidence l'importance de la répartition spatiale des erreurs (correspondance avec le sursol). Les outils d'évaluation qui ont été développés vont permettre la mise au point d'une chaîne d'évaluation de l'utilisation de la corrélation automatique pour la BDTopo. Une étude (étude préalable par Alain Dupéret : restitution altimétrique assistée par ordinateur) a d'ailleurs débuté dans ce sens.

Le but recherché à court terme est donc la mise au point d'une maquette comportant des outils d'évaluation sur la qualité géométrique et l'exhaustivité du relief principalement.

Publications

[BEAUVILLAIN 93] E. Beauvillain : *Qualité des Modèles Numériques de Terrain*, IGN, DT, Service de la Recherche, rapport interne SR n° 930008/C-RAP, mai 1993.

[BEAUVILLAIN, JAMET 94] E. Beauvillain & O. Jamet : *Evaluation de la qualité d'un MNT issu de corrélation automatique de photographies aériennes*, Séminaire SFPT-RSS, Grignon (F), 1-3 septembre 1994, à paraître dans le bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection n° 137.

C.1.2.6. Recherche de méthodes de lissage d'un MNT brut obtenu par corrélation automatique

par Edouard BEAUVILLAIN

Contexte et objectifs

Dans le cadre des activités d'aide à la restitution du relief, on est amené à utiliser des Modèles Numériques de Terrain (MNT) obtenus par corrélation automatique. Un des principaux problèmes consiste à déterminer une série de traitements sur ces MNT de façon à ce qu'ils respectent un certain nombre de critères : rendu cartographique, altimétrie et formes du terrain proches de la réalité.

Activités

Lors de l'expérience menée sur l'évaluation de la qualité de MNT (cf. § C.1.2.5.), plusieurs types de lissage d'un MNT issu de corrélation automatique ont été essayés afin de réduire les hautes fréquences altimétriques provenant du type de corrélation utilisé (corrélateur ponctuel DAUPHIN, cf. § C.1.2.4.). Finalement, deux types de lissage ont retenu notre attention :

- 1er type : filtre passe-bas éliminant les variations ponctuelles,
- 2ème type : avec contraintes sur les lignes caractéristiques du terrain.

Il est apparu que le deuxième type de lissage apporte de meilleurs résultats le long des cours d'eau notamment, alors que le premier lissage est meilleur entre les lignes caractéristiques [BEAUVILLAIN, JAMET 94]. Le rendu cartographique des courbes de niveau issues des différents MNT lissés est comparable aux exigences de la BDTopo.

Suites

Les résultats obtenus pour l'instant, bien que satisfaisants pour l'étude menée, restent limités. L'objectif est de déterminer un traitement qui soit satisfaisant sur tout type de terrain (suivant le relief et la présence éventuelle de sursol). Dans cette optique, on sera amené à renouveler les traitements sur d'autres sites tests.

La mise au point d'outils d'évaluation des courbes de niveau (forme et précision) serait une aide efficace à l'élaboration d'une méthode de traitement de MNT.

Publications

[BEAUVILLAIN, JAMET 94] E. Beauvillain & O. Jamet : *Evaluation de la qualité d'un MNT issu de corrélation automatique de photographies aériennes*, Séminaire SFPT-RSS, Grignon (F), 1-3 septembre 1994, à paraître dans le bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection n° 137.

C.1.2.7. Système d'analyse d'images aériennes appliqué à la restitution du relief

par Caroline BAILLARD

Cette étude est réalisée dans le cadre d'une thèse financée par l'IGN et commencée en fin d'année par C. Baillard sous la direction d'Henri Maître de l'Ecole National Supérieure des Télécommunications. L'objectif est de faire coopérer des algorithmes d'analyse monoscopique et stéréoscopique pour améliorer la restitution automatique et l'interprétation du relief en milieu péri-urbain.

Les algorithmes classiques de mise en correspondance par corrélation se montrent en effet souvent mal adaptés à la restitution du relief en milieu péri-urbain, en raison des nombreuses discontinuités de surface et de la diversité des objets présents. La modélisation des principaux objets de la scène et l'évaluation des traitements 2-D et 3-D concernés devraient permettre d'exploiter au mieux la complémentarité des algorithmes dans le cadre du modèle choisi. On pourra alors établir des schémas de traitement efficaces pour améliorer la restitution, tirant profit à la fois de l'analyse monoscopique, de l'analyse stéréoscopique, et de la connaissance a priori sur le comportement 2-D et 3-D des objets de la scène.

L'étude bibliographique du premier trimestre donnera lieu à un rapport interne résumant les différentes techniques de mise en correspondance utilisées pour la stéréovision (en cours de préparation).

Publications

[AIRAULT 93] S. Airault & O. Jamet : *Automatisation de la saisie des routes sur images aériennes*, Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 31, pp. 12-23, décembre 1993.

C.1.3. Extraction du réseau routier sur images aériennes

C.1.3.1. Introduction

par Sylvain AIRAULT

Cette recherche est destinée à proposer des solutions pour automatiser la saisie du réseau routier de la base de données topographiques. Elle se décompose en quatre axes complémentaires trouvant chacun leur spécificité soit à travers les pistes techniques abordées, soit à travers l'application visée. En effet, si l'objectif général est commun (l'automatisation de la saisie de la BDTopo), les ambitions (en termes de délai d'opérationnalité et de degré d'automatisation) et le contexte applicatif exact (saisie initiale ou mise à jour) diffèrent. En revanche, un certain nombre de préoccupations sont communes aux quatre axes : modélisation des connaissances, algorithmie de détection sur image, méthodes d'évaluation des résultats

Les quatre axes sont les suivants :

- l'approche semi-automatique sur image seule dont on peut attendre des gains de productivité modestes mais sous des délais assez courts. On compte ici sur l'opérateur pour combler les lacunes du système au niveau de la prise de décision (choix des amorces, confirmation, validation),

- l'approche "tout-automatique" sur image seule (thèse Renaud Ruskoné) consiste à automatiser les prises de décision de l'approche semi-automatique en rendant le système capable de choisir lui-même les amorces, de confirmer des hypothèses en interprétant localement la scène pour comprendre les causes d'interruption et d'auto-évaluer un résultat de manière à ne conserver que des objets extraits avec une bonne fiabilité,

- l'interprétation conjointe carte/image (thèse Philippe Guérin) consiste à utiliser la localisation approchée des routes ainsi que l'information symbolique obtenus par vectorisation automatique des cartes au 1 : 25 000 pour trouver les routes dans l'image. L'intérêt opérationnel de cette approche réside dans le fait que le contenu sémantique de la carte et celui de la BDTopo étant très voisins, cette approche pourrait être étendue à d'autres thèmes (hydrographie, occupation du sol...) et constituer une aide importante à la saisie de la BDTopo,

- l'interprétation de l'image à l'aide d'une base de données cartographiques (thèse Ghislaine Bordes) consiste à utiliser l'information sémantique d'une base de données pour chercher les routes dans l'image en utilisant des algorithmes différents suivant le contexte. L'intérêt opérationnel de cette approche est d'être très proche d'une problématique de mise à jour dans la mesure où l'on cherche à évaluer l'apport d'une connaissance du contexte local (connaissance dont on disposera toujours en mise à jour) sur le processus d'interprétation.

C.1.3.2. Approche semi-automatique

par Sylvain AIRAULT

Cet axe de recherche débuté en 1992 arrive à un stade où les contraintes ne sont plus dictées que par un souci d'opérationnalité dans le contexte de saisie BDTopo. Cette "finalisation" englobe trois préoccupations :

- fiabiliser l'outil de suivi de routes pour limiter les reprises manuelles (alors que dans le cas de l'automatisation totale, on privilégie plutôt dans un premier temps l'exhaustivité, quitte à obtenir de fausses détections),
- analyser les contraintes opérationnelles (temps réel, ergonomie...), ce qui doit conduire à la réalisation d'une maquette où l'outil de suivi automatique serait intégré dans un environnement traditionnel de saisie manuelle,
- être capable d'évaluer une saisie semi-automatique, à la fois en termes de temps de saisie, de qualité géométrique du résultat et d'exhaustivité.

Fiabilisation du suivi de route

Le méthode utilisée pour la détection des routes [AIRAULT 94a] consiste à générer un arbre de chemins possibles, de longueur suffisante pour être significative à l'échelle d'une route (50-150 mètres), et à évaluer ces différents chemins grâce à une fonction de coût sur l'homogénéité de la texture afin de conserver le meilleur. Chaque chemin est composé de segments de droite choisis localement suivant un critère de variance minimale. 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. Le critère d'homogénéité permet de parfaitement discriminer les routes des zones plus texturées (zones urbaines, péri-urbaines, zones de végétation). En revanche, certaines confusions peuvent encore se produire entre les routes et certains champs très homogènes, l'anisotropie de la texture des routes n'étant prise en compte que très partiellement lors du choix des directions de propagation possibles.

A défaut d'apporter une justification théorique aux critères utilisés, le travail de l'année a consisté à montrer empiriquement l'efficacité des critères pour la séparation des différents objets présents au voisinage des routes, dans le but de les affiner [AIRAULT 94b].

Deux mesures ont été implantées pour éviter la confusion entre des zones homogènes de différentes natures, prenant en compte la forme et la dimension des objets :

- Un indicateur de dispersion spatiale des chemins de l'arbre. Cette mesure ne permet pas pour le moment de générer et d'évaluer plusieurs hypothèses de tracé mais permet d'interrompre la propagation lorsque la moyenne des écarts entre chacun des points de l'arbre et le meilleur chemin au sens de la variance est supérieure à un seuil;

- Utilisation d'indicateurs de forme pré-calculés sur le résultat d'une segmentation complète de l'image. Les indicateurs de forme (caractérisant l'allongement des régions) permettent de discriminer les routes des champs et d'isoler avec une bonne fiabilité les routes de tout autre objet en introduisant cette mesure dans le calcul de la fonction de coût utilisée dans le suivi de routes....

Maquette de saisie

Une maquette de saisie semi-automatique du réseau routier est en cours de développement [CLINCKX 94]. Elle doit permettre d'effectuer des tests dans le courant de l'année 1995 et d'aboutir à des évaluations sur la qualité géométrique du réseau extrait et sur les temps de saisie par comparaison avec la précision et les temps de saisie actuels de la BDTopo.

Une adaptation a été réalisée pour effectuer la tâche de lissage localement pendant le suivi. En effet, la démarche préconisée jusqu'à présent consistait en un lissage complet à l'issue de la phase de détection. Cela est rendu impossible dans un contexte d'utilisation interactive, l'opérateur ne pouvant pas valider une détection sans connaître la géométrie définitive du tracé. La méthode qui est en cours de test revient à remplacer l'ajustement global (utilisant les contours actifs) par un lissage local utilisant des splines cubiques d'ajustement. Les splines sont calculées entre les derniers points pour lesquels on a une connaissance fiable de la géométrie (d'après une détection de bords parallèles) en affectant des poids différents à ces points fiables et aux points quelconques du tracé détecté.

Evaluation de la qualité géométrique des résultats du suivi de routes

Des mesures ont été effectuées [AIRAULT 94c] pour évaluer la qualité géométrique des tracés issus du suivi de routes par rapport à une référence saisie manuellement à l'échelle de 1 : 20 000. La méthode utilisée pour cette évaluation consiste à apparier automatiquement les arcs des deux graphes en générant sur le premier graphe des points intermédiaires à intervalle régulier et en recherchant pour chacun de ces points le segment le plus proche dans le second graphe. Les écarts aberrants (supérieurs à un seuil calculé d'après l'histogramme des écarts) sont ensuite éliminés du calcul des moyennes. Les écarts suivants, entre le suivi et la référence (fig. C.1.3.2.1.) et entre la BDTopo et la référence (fig. C.1.3.2.2.), sont exprimés en mètres.

	n	seuil	% rejet	mx	my	mxy	ECTxy	EMQxy
suivi --> référence	4140	4,7	2,4	0,17	0,31	0,93	1,09	1,25
référence --> suivi	4209	5,5	24,5	- 0,19	- 0,30	1,02	1,16	1,40

figure C.1.3.2.1. : comparaison des résultats du suivi de route avec la référence

	n	seuil	% rejet	mx	my	mxy	ECTxy	EMQxy
BDTopo --> référence	5268	5,5	0,9	0,05	0,16	1,15	1,23	1,51
référence --> BDTopo	5366	5,7	3,7	- 0,06	- 0,18	1,16	1,24	1,54

figure C.1.3.2.2. : comparaison de la BDTopo avec la référence

Les écarts observés sont du même ordre de grandeur. On obtient même un léger gain de précision avec le suivi automatique, dû à l'utilisation de clichés au 1 : 20 000 (la BDTopo étant saisie à partir de clichés au 1 : 30 000).

Publications

[AIRAULT 93] S. Airault & O. Jamet : *Automatisation de la saisie des routes sur images aériennes*, Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 131, pp. 12-23, décembre 1993.

[AIRAULT 94a] S. Airault & O. Jamet : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aériennes*, Congrès AFCET / RFIA, Paris (F), janvier 1994.

[AIRAULT 94b] S. Airault, R. Ruskoné & O. Jamet : *Road detection from aerial images : a cooperation between local and global methods*, European Symposium on Satellite Remote Sensing (Image and Signal Processing for Remote Sensing), Rome (I), september 1994.

[AIRAULT 94c] S. Airault & O. Jamet : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aériennes*, Traitement du signal (TS), à paraître.

[CLINCKX 94] P. Clinckx : *Maquette de saisie semi-automatique du réseau routier*, rapport de stage du DESS Systèmes et Communication Homme-Machine (Paris XI), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, septembre 1994.

[IGN 94] Bilan de la recherche 1993, rapport d'activité, IGN, Service de la recherche, Bulletin d'information de l'IGN, n° 62, 1994.

C.1.3.3. Approche automatique

par Renaud RUSKONÉ

Des systèmes basés uniquement sur des connaissances de bas-niveau ne peuvent prétendre dépasser le stade d'un semi-automatisme limité. En effet, de nombreux obstacles limitant l'exhaustivité de la détection subsistent; ces obstacles sont principalement liés à l'interruption du suivi. Les caractéristiques de la route sur lesquelles s'appuient les algorithmes de suivi ne peuvent évidemment pas rendre compte de la diversité des configurations rencontrées. L'introduction de compétences de plus haut-niveau s'impose donc si une automatisation accrue est envisagée.

L'extraction automatique du réseau routier se compose de quatre étapes :

- extraction d'amorces de route,
- suivi de route,
- reconstruction/complètement du réseau,
- filtrage des segments ainsi détectés par interprétation locale du contexte.

Reconstruction de graphe

Cette étape repose sur la génération d'hypothèses de connexion entre des segments détectés (lors de l'étape de suivi), sur des critères topologiques. Ces critères peuvent se résumer ainsi : les extrémités libres ou les arcs isolés sont rares, les tronçons avec une forte courbure sont minoritaires (colinéarité des portions à relier), deux chemins de même longueur relient rarement deux points voisins.

Les deux premiers critères aboutissent à la génération d'hypothèses par une analyse très locale du contexte sur des critères de colinéarité et de proximité. Ensuite, ces hypothèses sont vérifiées par recherche du chemin de coût minimal à travers l'ensemble du réseau détecté.

Résolution locale des causes d'interruption du suivi

Notre approche consiste à générer un réseau routier le plus exhaustif possible même au prix d'un nombre important de fausses détections. La détection peut donc se résumer aux filtrages de ces détections erronées grâce à l'utilisation de connaissances de plus haut-niveau et notamment grâce à l'utilisation de modules indépendants dédiés chacun à la reconnaissance d'un objet particulier (spécialistes). La démarche employée est de construire parallèlement une stratégie d'utilisation des différents spécialistes, basée sur les données du suivi de route à l'endroit de l'interruption, sur des hypothèses statistiques et sur des évaluations des hypothèses renvoyées par les spécialistes.

Actuellement, deux spécialistes sont en cours de réalisation. Le premier concerne l'identification des rangées d'arbres, le second le traitement des carrefours :

- Spécialiste "rangées d'arbres" : Les arbres en bordure de route sont une cause fréquente d'arrêt du suivi à cause de l'ombre se projetant sur la chaussée ou par l'emprise des branches. Ce module d'identification des rangées d'arbres a été développé dans le cadre d'un stage [LECOURT 94]. Il repose sur la caractérisation des arbres selon des critères texturaux et géométriques.

- Spécialiste "carrefour" : L'intérêt pour les carrefours se justifie aisément par leur importance au niveau topologique. L'objectif d'un tel spécialiste est de déterminer la position exacte du centre du carrefour en identifiant les branches qui s'y raccordent. Ce module fonctionne par analyse du profil radiométrique selon des cercles concentriques et par comparaison des signaux observés.

L'année 1995 sera essentiellement consacrée au développement de l'étape de validation locale.

Publications

[RUSKONÉ 94a] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road network interpretation : a topological hypothesis-driven system*. ISPRS commission III proceedings, vol. 2, pp. 711-717, Munich (D), septembre 1994.

[RUSKONÉ 94b] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *A road extraction system using the connectivity properties of the network*, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, n° 5, pp. 174-180, septembre 1994.

[RUSKONÉ 94c] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road network interpretation : a topological hypothesis-driven system*, EuroConférence SIG, Saint-Mandé (F), Septembre 1994.

[LECOURT 94] F. Lecourt : *Reconnaissance des rangées d'arbres sur les images aériennes*, rapport de stage du DEA Sciences de l'Information Géographique (ENSG), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, septembre 1994.

C.1.3.4. Interprétation conjointe carte-image

par Philippe GUÉRIN

Il s'agit d'une thèse, débutée en septembre 1993 qui vise à développer des techniques d'interprétation de photos aériennes en guidant l'analyse par des données externes symboliques issues d'une carte topographique. Le premier thème abordé concerne l'extraction du réseau routier. Une étude des méthodes existantes en matière d'analyse automatique de clichés aériens a montré la relative maturité des techniques pour extraire les chaussées, là où le modèle classique (linéarité, bords parallèles et homogénéité radiométrique de la surface) est respecté. La carte prend alors le relais lorsque ce n'est pas le cas, palliant aux insuffisances de l'image. Cette contribution permet d'envisager la restitution complète des objets contenus dans la scène.

Cependant, les cartes ne sont pas non plus sans faiblesse; les différentes phases de leur conception ont entraîné modifications, simplifications et transformations, dont les effets sont d'autant plus importants que l'échelle du document est petite. D'un autre côté, la récupération des informations contenues dans la carte n'est pas sans perte : la vectorisation d'une carte scannée induit inévitablement des déformations qu'il convient de caractériser et de minimiser. L'année 1994 a donc été principalement consacrée à définir toute l'étendue de l'apport possible de la carte, et à estimer ses limites.

Récupération des informations contenues dans la carte

Pour ce faire, nous avons développé un algorithme d'extraction automatique des routes. Détecteurs bas-niveaux et opérateurs de morphologie mathématique sont enchaînés en s'appuyant sur une connaissance minimale de la légende pour fournir un graphe du réseau routier. Une phase de reconstruction permet alors de compléter ce graphe là où les détections se révèlent incomplètes, utilisant les règles intrinsèques de construction d'un réseau routier. Un attribut de fiabilité est associé à chaque arc pour exprimer la confiance accordée lors de sa détection.

Etude du modèle de déformation carte-image

Nous travaillons sur des cartes topographiques au 1 : 25 000. Une étude des déformations existantes tant au plan topologique que géométrique est élaborée, en dissociant les aspects quantitatif et qualitatif. Dans un premier temps, un inventaire a priori des déformations est établi à partir de la connaissance des règles de rédaction cartographique. Puis un contrôle ponctuel est effectué entre la carte et l'image, basé sur une saisie manuelle du réseau routier sur les deux documents et sur l'identification de points précisément localisables. Un contrôle des structures linéaires augmente la densité de l'échantillon et fournit des statistiques globales sur la scène. A notre échelle de travail, nous avons ainsi pu définir que la carte fournit une topologie globale exacte du réseau routier dans la scène, une topologie locale approchée au niveau des carrefours (approximation d'autant plus prononcée que l'intersection est plus complexe) et une géométrie approchée des tronçons de route, les décalages carte-image étant bornés par la précision intrinsèque de la carte.

Les développements futurs de ce travail chercheront à dériver ce modèle de déformation vers un modèle de prédiction : quelle allure et quel positionnement pourront être supposés pour un arc de route, connaissant sa configuration exacte sur la carte et disposant de son attribut de fiabilité lié à la phase d'extraction.

Publications

- [GUÉRIN et al 94a] Ph. Guérin, S. Airault, H. Maître & O. Jamet : *Recalage de données vecteur sur une image aérienne en vue d'une extraction automatique du réseau routier*, in proceedings EGIS-MARI'94, Paris (F), pp. 1122-1130, avril 1994.
- [GUÉRIN et al 94b] Ph. Guérin, S. Airault, H. Maître & O. Jamet : *Interprétation conjointe carte scannées et images aériennes* - 3ème colloque national sur l'écrit et le document, Rouen (F), pp. 185-194, juillet 1994.
- [GUÉRIN et al 94c] Ph. Guérin, H. Moissinac, I. Bloch & H. Maître : *Image interpretation using symbolic data*, in proceedings "7th European Signal Processing Conference", Edinburgh, Scotland (GB), pp. 431-434, septembre 1994.

C.1.3.5. Interprétation d'images aériennes guidée par la Base de Données Cartographique

par Ghislaine BORDES

Cette étude est réalisée dans le cadre d'une thèse (sous la direction Gérard Giraudon, INRIA) débutée fin 1993. Son objectif est d'étudier l'apport de données externes pour l'interprétation d'images aériennes, en particulier pour l'extraction des routes. Les données externes utilisées sont fournies par la BDCarto; leur précision est de vingt mètres environ alors que le résultat de l'interprétation de l'image doit être de l'ordre du mètre. Le travail essentiel de l'année 1994 a consisté à définir un système d'interprétation en tenant compte d'une part des données de la BDCarto et de leurs caractéristiques et d'autre part des traitements existants pour l'extraction des routes.

Nous avons défini l'architecture du système et la stratégie générale d'interprétation. Ce système est composé d'une base de connaissances contenant en particulier les informations externes issues de la BDCarto et de différents schémas d'extraction de routes. Parmi les données de la BDCarto, nous retenons pour notre application le réseau routier et ses attributs, les zones d'occupation du sol, le réseau ferroviaire et le réseau hydrographique. Les schémas d'extraction de routes sont en fait des enchaînements d'algorithmes de bas et moyen niveau adaptés à l'extraction des routes dans différents contextes et pour différents types de routes. Le système disposera dans un premier temps de quatre schémas d'extraction paramétrables fondés sur des algorithmes différents : suivi par profil, suivi par homogénéité, chapeau haut de forme, gradient de Deriche.

La stratégie générale d'interprétation consiste à rechercher dans l'image les primitives routières correspondant aux tronçons routiers contenus dans la BDCarto, et ceci en commençant par les tronçons les plus "faciles" a priori, c'est-à-dire ceux qui sont a priori bien situés dans la base de données et bien visibles dans l'image. Pour chaque tronçon routier, le système devra choisir un schéma de traitement et adapter ses paramètres en fonction du type du tronçon. Pour les tronçons plus difficiles, on s'appuiera sur les tronçons déjà détectés, d'autre part il sera possible d'exécuter plusieurs schémas et de fusionner leurs résultats.

Les deux points-clefs de cette stratégie d'interprétation sont :

- le classement des tronçons par ordre de "facilité". Les caractéristiques du tronçon permettent de faire une hypothèse sur la précision de son positionnement dans la base de données et sur son aspect dans l'image. Cette hypothèse s'appuie sur l'étude statistique, réalisée fin 1994, qui évalue la qualité du positionnement des tronçons routiers de la BDCarto en fonction de leurs attributs propres et de leur contexte. Cette hypothèse "a priori" sera complétée par des sondages (indices pictoriels) effectués dans l'image à l'emplacement supposé du tronçon routier,

- le choix du schéma à exécuter selon le type du tronçon et son contexte. Ce choix devra s'appuyer sur une mesure de vraisemblance prévisible du résultat fourni par un schéma pour un tronçon routier donné.

Le travail à effectuer en 1995 concernera ces deux points-clefs. Il faudra d'une part définir précisément les indices pictoriels et la méthode de classement des tronçons. D'autre part, pour mettre au point la mesure de vraisemblance entre schémas et tronçons routiers, nous réaliserons des tests pour les quatre schémas proposés sur différents types de tronçons routiers. L'objectif de l'année à venir est de mettre en place les différents mécanismes de contrôle et de déclenchement définis en 1994.

Publications

- [BORDES et al 94] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Interpretation of aerial imagery driven by a cartographic database : application to automatic road extraction*, Euroconférence SIG, Saint-Mandé (F), septembre 1994.

C.1.4. Extraction du bâti à partir de photographies aériennes

C.1.4.1. Introduction

par Olivier DISSARD

Cette recherche a débuté au laboratoire MATIS en 1991 par une thèse financée par l'IGN et dirigée par Henri Maître de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications qui a été soutenue le 12 décembre 1994 à l'ENST. L'objectif de cette thèse était de fusionner les résultats d'une étape de corrélation ponctuelle et les résultats d'une étape de reconnaissance des bâtiments de forme rectangulaire, par un lissage des parallaxes de la première étape par des modèles plans, à l'intérieur des régions détectées à l'issue de la deuxième étape.

Cette fusion était motivée par les défauts de chacune des étapes prises séparément :

- d'une part la dégradation de la précision lors de l'enchaînement des algorithmes de reconnaissance utilisés ne permet pas d'envisager une mise en correspondance des structures détectées sur les deux images séparément avec la précision voulue,

- d'autre part les imprécisions et l'inhomogénéité de la carte des parallaxes prise seule rend toute détection d'objet géométrique impossible.

L'année 1993 avait été consacrée à l'étape de reconnaissance des formes; l'année 1994 a été consacrée à la reconstruction en 3 dimensions des bâtiments, à une première évaluation des résultats et à la rédaction de la thèse.

Des tests effectués sur des sites issus de photographies aériennes au 1 : 20.000 scannées à vingt microns, ont permis de déceler des erreurs systématiques corrigées pour certaines en améliorant les algorithmes en amont. Pour plus de détails sur les algorithmes et les évaluations, on pourra consulter l'article B.3.

Par ailleurs, les différentes étapes du processus développé dans le cadre de la thèse ont été décomposées, programmées sous forme de fonctions. Certaines de ces fonctions formant un algorithme de corrélation de chaînes de contours, ont été transférées avec succès sur une station photogrammétrique SYSECA dans le cadre de l'évaluation de ce matériel.

L'année 1995 sera destinée à tirer les enseignements de cette expérience :

- Une évaluation plus poussée permettra de mieux comprendre les dégradations constatées lors des étapes de reconnaissance des formes (erreurs dues à l'étape en cours, propagation des erreurs des étapes précédentes), on évaluera par ailleurs l'apport de l'étape de corrélation par rapport à un processus de mise en correspondance stéréoscopique des formes détectées;

- On cherchera une modélisation différente des objets et des traitements qui permette de faire des retours en arrière et d'adjoindre au processus des algorithmes de détection et de validation basés sur le contexte. Cette démarche est à rapprocher de l'action concernant l'analyse des images aériennes pour la restitution du relief (paragraphe C.1.2.7.) dans laquelle une modélisation de la scène et des traitements permettra de définir des stratégies efficaces de coopération entre algorithmes monoscopiques et algorithmes stéréoscopiques pour la restitution du relief en milieu périurbain. L'utilisation d'ombres détectées en sera une première application.

Par ailleurs, des pistes algorithmiques complémentaires seront exploitées, elles prendront en compte les informations stéréoscopiques dès les processus de traitement bas-niveau et mettront l'accent sur des démarches par optimisation (voir paragraphe C.1.4.2. .) .

C.1.4.2. Restitution des bâtiments pour la mise à jour d'une base de données

par Olivier JAMET

Les travaux effectués en 1994 sur la restitution des bâtiments [DANG 94] montrent que, si les résultats présentent un intérêt pour la restitution des grandes structures, leur application opérationnelle ne peut être envisagée qu'à moyen terme. Compte tenu de la sensibilité des méthodes proposées, le traitement d'une majorité de l'habitat à partir de couples de photographies aériennes à l'échelle du 1 : 20 000 ou du 1 : 30 000 ne peut être envisagé dans l'immédiat (la méthode est mise en échec sur le bâti de petite taille). Dans cette perspective, nous proposons de compléter les axes de recherche visant à améliorer la robustesse des traitements par le démarrage en 1995 du sujet présenté ci-après.

Du point de vue de l'application, on se placera dans une optique de mise à jour de la base de données. L'objectif reste la restitution des bâtiments, mais dans un contexte où l'on dispose déjà d'information saisie.

Du point de vue des outils employés, on tentera de limiter le nombre de paramètres de contrôle des algorithmes en mettant en oeuvre des techniques d'optimisation s'appuyant plus sur le bas niveau.

Plus précisément, la démarche envisagée s'appuiera sur deux composantes. La première concerne la modélisation en 3 dimensions des structures bâties. Dans la méthode mise en oeuvre les années précédentes, la modélisation des bâtiments repose sur une décomposition hiérarchique; les structures cherchées sont in fine des parallélépipèdes, mais la recherche se fait par étapes : en premier lieu, on identifie les droites de l'une des images (traitement monoscopique), puis des rectangles sont construits sur ces droites (traitement monoscopique) sans remise en cause de leur détection; enfin, les rectangles sont positionnés en 3-D en s'appuyant sur des parallaxes issues de corrélation (méthode des modèles de surfaces [MAÎTRE 92]). Les faiblesses de la méthode reposent en partie sur cette décomposition en étapes indépendantes. La propagation des erreurs de détection n'est pas contrôlée. On peut envisager deux types d'approche pour augmenter la robustesse. D'une part, on peut gérer des remises en cause des étapes précédentes en fonction des résultats de l'étape courante (rajustement des paramètres de recherche des droites pour compléter des hypothèses de rectangles, voire retour à l'image et à des traitements de bas niveau). D'autre part, on peut chercher à limiter le plus possible les prises de décisions sur les étapes intermédiaires, en conservant une information "complète" évaluée par des fonctions de vraisemblance, et à rechercher l'optimum du modèle dans l'espace défini par ces fonctions. Nous proposons d'explorer cette seconde approche. Le contexte de la mise à jour pourra ici jouer un rôle important dans l'ajustement des paramètres du modèle : on disposera d'une base d'apprentissage sur les objets n'ayant pas évolué.

La seconde composante de la démarche porte sur les traitements de bas niveau utilisés. Dans la méthode actuelle, le modèle 3-D est extrait à partir de résultats de traitement en monoscopie. Outre le fait que les opérateurs de détection monoscopique utilisés ne sont probablement pas optimaux, et que la propagation des erreurs n'est pas gérée, on peut penser que l'on gagnerait à faire intervenir la stéréoscopie le plus tôt possible dans le processus (par analogie à la vision : l'identification des objets est plus facile en stéréoscopie pour un opérateur humain). Un second axe de travail portera donc sur la définition de traitements de bas niveau "stéréoscopiques" (extraction de contour, segmentation...).

Cette recherche sera réalisée dans le cadre d'une thèse de l'ENST, sous la direction d'Henri Maître.

Publications

[DANG 94] T. Dang : *Interprétation et Restitution Automatiques des Bâtiments Isolés à partir d'un Couple Stéréoscopique de Photographies Aériennes*, thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, décembre 1994

Références

[MAÎTRE 92] H. Maître & W. Luo : *Using models to improve stereo reconstruction*, IEEE PAMI, vol. 14, n° 2, pp. 269-277, february 1992.

C.1.5. Traitement d'images SPOT pour l'occupation du sol

C.1.5.1. Introduction

par Olivier JAMET

Les études conduites dans ce cadre appartiennent aux activités de valorisation de recherches antérieures du laboratoire MATIS. Si les recherches concernant l'exploitation des images SPOT et la cartographie de l'occupation du sol sont peu présentes dans les programmes de recherche actuels, fortement centrés sur l'imagerie aérienne, le passé du laboratoire (et plus généralement de l'IGN) dans ce domaine permet de proposer des réponses à des besoins émanant des services de production.

En 1994, les points abordés dans ce cadre ont concerné des applications liées à la gestion de la couche d'occupation du sol de la BDCarto. La première est le passage en version 2 de la couche d'occupation du sol existante: on propose l'adaptation d'outils de généralisation de l'occupation du sol pour effectuer la mise à niveau de la base saisie en version 1 de manière semi automatique (cette mise à niveau correspond à une réorganisation de la légende et augmentation des seuils de représentation des classes). La seconde concerne le processus de mise à jour de la couche d'occupation du sol : les travaux conduits en 1994 visent à une première évaluation d'outils de télédétection spatiale pour alléger le processus de mise à jour de la base.

C.1.5.2. Généralisation de la carte d'occupation du sol

par Hervé LE MEN

Contexte

En ce qui concerne l'occupation du sol, la version 2 de la BDCarto (V2) se distingue de la version 1 (V1) par un changement des seuils de sélection en surface et par une légère réorganisation des thèmes (fusion vignes-vergers, distinction des zones industrielles, abandon de la classe "culture" comme classe de rejet...) (voir [BDC-AB/SP01]). On propose ici un algorithme de généralisation automatique pour la prise en compte des changements de seuils de surface. Cette étude a été menée en liaison avec le projet BDCarto V2.

Principe

Le principe de l'algorithme est de se ramener à la recherche d'un sous-graphe minimisant une fonction de coût. L'analyse des opérations utilisées par le cartographe (fusion, aggrégation, dilatation, destruction-partage et jonction) permet de ramener toutes ces opérations à la transition thématique d'un morceau de surface. On définit une fonction de coût de transition du thème initial vers le thème final (non symétrique) à partir de la hiérarchie implicite définie par les proximités thématiques empiriques définies par l'expérience, et prenant en compte de plus un facteur de forme qui vise à favoriser les formes résultantes les plus simples. Le coût de transition thématique est par ailleurs proportionnel à la surface. On se ramène ensuite à la recherche dans un sous-graphe par construction d'un sur-graphe du graphe géométrique initial (toute opération autorisée par le cartographe a pour résultat un sous-graphe de ce sur-graphe).

L'algorithme génère ensuite toutes les partitions possibles des faces de ce sur-graphe et évalue pour chaque partition le coût de transition thématique total : cette recherche est fortement combinatoire, mais reste en pratique rapide (rarement plus de mille configurations étudiées pour un agglomérat de petites zones).

Bien que les spécifications de la V1 et de la V2 ne diffèrent pas en ce qui concerne les distances minimales entre objets, on est amené à prétraiter la géométrie initiale pour éliminer les distances trop courtes (la V1 ne respecte pas ses spécifications sur ce point). On procède par une succession d'opérations de morphologie mathématique qui suppriment les rétrécissements localement inférieurs à 20 m et qui portent à plus de 50 m les rétrécissements localement supérieurs à 20 m.

Résultats des tests

Le test a porté sur trois demi feuilles au 1 : 50 000 (Chateau-Thierry, Samoëns, Perpignan). On a comparé une saisie manuelle indépendante (interprétation aux spécifications V2 à partir de l'image SPOT), une généralisation manuelle, la généralisation automatique (après réinterprétation des quelques thèmes ayant changé de contenu), et une référence plus détaillée réalisée par photo interprétation et enquête de terrain. Toutes ces données ont été comparées selon la méthode définie dans [LE MEN 93], qui d'ailleurs portait sur les mêmes zones, ce qui permet de plus une évaluation du changement de qualité entre la V1 et la V2.

	Samoëns	Château-Thierry	Perpignan	moyenne
automatique/manuelle	5,2	1,3	0,1	2,2
	6,9	3,6	0,9	3,8
manuelle/saisie V2	15,3	3,3	8,0	8,9
	17,2	6,9	9,1	11,1
automatique/saisie V2	18,0	3,8	8,3	10,0
	20,1	7,6	9,4	12,4
saisie V2/référence	24,8	2,9	20,1	15,9
	28,5	10,4	30,0	23,0
automatique/référence	17,5	3,6	22,5	14,5
	22,1	9,9	31,1	21,0
manuelle/référence	17,3	4,0	22,5	14,6
	22,5	11,0	31,1	21,5

tableau C.1.5.2.1

% d'écart entre les données, la seconde étant prise comme référence.

1ère ligne = surface des objets mal classés

2ème ligne = somme des surface en désaccord thématique (écart point à point)

Il ressort de ces tests que l'écart entre une généralisation automatique et une généralisation manuelle est de beaucoup plus faible (trois à quatre fois) que l'écart entre deux saisies indépendantes.

Vis à vis de la ressemblance au terrain nominal, les meilleurs résultats sont dans l'ordre pour la généralisation automatique, puis la généralisation manuelle et enfin la nouvelle saisie.

Enfin, le changement de spécifications entre la V1 et la V2 permet effectivement d'améliorer la qualité de la base (au sens du respect des spécifications): sur cet exemple l'écart aux spécifications diminue de 3% en moyenne sur les trois sites. Cet écart résiduel est maintenant du même ordre de grandeur que la variabilité entre deux interprétations ce qui doit s'interpréter comme lié à la variabilité d'appréciation des frontières entre thèmes sur le terrain (par exemple transformation progressive d'un alpage en rocher) et donc difficilement réductible.

Conclusion

Le passage de la V1 à la V2 pour l'occupation du sol de la BDCarto pourra être réalisé selon cette méthode, une fois que seront précisés les modes d'implémentation en production. Le traitement est rapide mais trop gourmand en place disque (passage vecteur maillé à différentes reprises) pour traiter la France entière d'un seul bloc. On s'oriente vers un traitement en blocs de cinquante à cent feuilles, avec gestion manuelle des raccords entre blocs.

Cet algorithme de généralisation automatique devrait par ailleurs pouvoir être associé à la méthode d'interprétation semi-automatique sur segmentation d'image (voir § C.1.5.3.), pendant la phase de propagation du classement flou : il suffit de considérer alors que la matrice de coût de transition thématique est remplacée par la matrice d'appartenance floue.

Publications

[BDC -AB/SP01] BDCarto, spécification de contenu; version de production 2.1 du 9 Mai 1994

[LE MEN 93] H. Le Men & O. Jamet : *Qualité de processus d'interprétation et qualité des résultats : un exemple en cartographie d'occupation du sol*, Symposium ACI, Tunis (TU),1993, in Bulletin du Comité Français de Cartographie n° 142-143, décembre 1994

C.1.5.3. Interprétation de l'occupation du sol sur Images SPOT

par Olivier JAMET

Cette recherche s'inscrit dans le contexte des études conduites en production pour la mise à jour de l'occupation du sol de la BDCarto. La couche occupation du sol de la BDCarto a été interprétée à partir d'images SPOT multispectrales à vingt mètres de résolution. Elle fournit une cartographie complète du territoire national pour une légende simplifiée d'une dizaine de postes. La mise à jour de cette information se fera par interprétation du même type d'images.

L'objectif est d'évaluer la possibilité d'automatiser, au moins partiellement, la détection des changements d'occupation du sol, voire l'identification de la classe actuelle des objets ayant évolué. Les travaux conduits en 1994 ont consisté à évaluer des outils de classification automatique dans un contexte de saisie initiale. La méthode proposée repose sur une segmentation de l'image SPOT à interpréter, puis sur un classement supervisé des parcelles segmentées. La mise en oeuvre de ce test, et en particulier le choix d'une évaluation dans un mode opératoire de saisie initiale, était motivée par deux éléments :

- le premier est la difficulté à choisir des sites de test convaincants pour une expérience de mise à jour : compte tenu du caractère récent de la base (les saisies les plus anciennes datent de 1990), il n'était pas possible de trouver des zones tests significatives (ayant suffisamment changé) sur des paysages autres que les périphéries de ville,

- le second est l'existence de données provenant d'expériences antérieures : en 1993, une comparaison de méthodes de saisie manuelles avait été effectuée sur trois sites (milieu rural à parcellaire moyen, milieu rural à petit parcellaire, et milieu montagneux); l'existence de ces données fournissait non seulement des données de référence (saisie par photo-interprétation et enquête de terrain), mais également des résultats d'évaluation de la qualité de la base actuelle, que l'on pourrait confronter directement avec les évaluations des interprétations semi-automatiques.

L'expérience a donné lieu à un rapport de stage [GRENIER 94] et à une publication [LE MEN 94]. La méthode proposée donne des résultats proches de ceux de la saisie manuelle (qualité un peu moins bonne, mais acceptable, sur le parcellaire moyen, et équivalente ou meilleure sur les deux autres sites). En tout état de cause, si son utilisation pourrait poser question dans le cadre d'une réfection de la couche d'occupation du sol, elle paraît pouvoir satisfaire les besoins de la mise à jour (les pertes éventuelles de qualité par rapport à la saisie initiale restent sans commune mesure avec le défaut d'actualité du fond cartographique du 1 : 50 000).

L'expérience reste toutefois incomplète. Si la méthode de segmentation et l'algorithme de classement supervisé paraissent répondre au besoin, les possibilités d'utilisation des mêmes techniques pour la détection des changements n'ont pas été évaluées. Une étude préalable sera conduite dans ce sens en 1995.

Publications

[GRENIER 94] F.Grenier : *Interprétation Assistée pour l'Occupation du Sol*, rapport de stage ENSAR, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, septembre 1994.

[LE MEN 94] H. Le Men & O. Jamet : *Evaluation de la Qualité d'Interprétations d'Images SPOT en Occupation du Sol*, Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 137, Actes du colloque SFPT/RSS "Qualité de l'Interprétation des Images de Télédétection pour la Cartographie", Grignon (F), septembre 1994, à paraître.

C.1.6. Reconnaissance automatique des cartes scannées

C.1.6.1. Introduction

par Marc PIERROT DESEILLIGNY

Cette étude se situe dans le contexte de l'aide à la saisie de la BDTopo. L'objectif est, à partir des cartes au 1 : 25.000 scannées sur planches-mères, d'obtenir une interprétation complète de la carte dans le but :

- de créer des bases de données d'attente,
- de faciliter l'interprétation automatique de photos aériennes en se ramenant au problème du recalage fin de données topologiquement correctes; la carte contient en effet une grande partie des informations de la BDTopo.

Cette utilisation indirecte nécessite d'arriver, pour être économiquement rentable, à une analyse totalement automatique avec vérification sur les seuls cas douteux alertés par le programme.

Cette action se situe dans le prolongement des travaux décrits avec plus de détails en B.4. Lors de ces travaux on a obtenu des résultats prometteurs sur l'interprétation de la planche de noir et, notamment, sur :

- la reconnaissance automatique des toponymes (taux d'erreurs équivalent à ceux d'une saisie manuelle),
- la reconnaissance des réseaux,
- la reconnaissance du bâti.

Lors de ces travaux, il est apparu que les erreurs qui subsistaient dans les méthodes développées ne pourraient, en général, être résolues que par une compréhension suffisamment globale de la carte.

Le travail de l'équipe s'oriente donc vers :

- une analyse systématique des différentes planches (bleu et rouge à l'IGN, vert en collaboration avec l'Université Paris V),
- un approfondissement du travail sur la planche de noir qui est, sans doute, celle qui résistera le plus longtemps à une compréhension exhaustive totalement automatique,
- une modélisation et systématisation de l'interaction entre couches.

C.1.6.2. Analyse multicouches

par Robert MARIANI

Cette thèse, débutée en octobre 1994, se situe dans le cadre de l'interprétation de cartes géographiques scannées. Elle a pour objectif de définir et de construire un modèle dans lequel la représentation des connaissances autorise un raisonnement hypothétique et prend en compte l'incertitude. L'analyse multicouches consiste, d'une part, à recenser de façon exhaustive, les contraintes qui existent entre deux objets de la carte, et d'autre part à fournir un mécanisme de résolution de conflits entre plusieurs objets, afin de valider l'extraction de ceux-ci. L'analyse qui suit en est encore au stade de la réflexion, les premiers mois de la thèse ayant été aussi consacrés à des développements de certains extracteurs bas niveau qui facilitent la reconstruction du réseau hydrographique. Cette dernière est en cours de réalisation.

Nous distinguons trois catégories différentes d'interactions entre les objets figurant sur la carte : la composition, l'occultation et l'attribution de nom. Un objet composé est obtenu par agrégation d'objets de base. La liste finie de ces objets est donnée par la légende (péage, pont, cours d'eau bordé d'arbres...). Un objet occulté est un objet partiellement recouvert par un autre objet (pont qui traverse un fleuve...). Un objet nommé est un objet de la carte auquel on a associé un nom qui figure aussi sur la carte.

Ceci nous conduit à envisager trois types de traitements différents : l'analyse globale, l'analyse locale et l'association d'un nom à un objet. L'analyse globale de l'image consiste à extraire les objets, éventuellement composés, et à leur attribuer un degré de fiabilité. L'analyse locale permet de résoudre un conflit entre plusieurs objets en une zone donnée. Résoudre un conflit, c'est valider l'hypothèse qui a déclenché cette analyse locale (retour sur l'image initiale et vérification). Enfin, il existe deux façons d'associer un nom à un objet : soit rechercher un objet à partir d'une chaîne de caractères (cas des objets ponctuels), soit rechercher une chaîne à partir d'un objet (objets linéaires). En fonction des données et des traitements à réaliser, nous proposons une modélisation basée sur une société de spécialistes.

Modélisation de la connaissance

Au niveau de la représentation des connaissances, nous distinguons trois grandes familles : celle des objets graphiques, celle des objets textuels et celle des objets abstraits. Un objet graphique est un symbole de la carte (puits, maison...). Un objet textuel est une chaîne de caractères (nom...). Seul l'objet abstrait ne figure pas sur la carte. Il est obtenu après une phase d'interprétation qui dépasse le cadre de l'extraction. Ainsi, le concept de "réseau hydrographique" constitue, par exemple, un objet abstrait. Il résulte d'une interprétation "mentale" mais il n'est physiquement pas présent sur la carte.

A chaque type d'objet (graphique, textuel ou abstrait), correspond un spécialiste qui aura plusieurs fonctions, et qui communiquera avec les autres spécialistes par envoi de message. Les fonctions dont ils disposent sont l'extraction, la composition (cas des objets composés), la résolution des occultations, l'analyse locale et l'attribution de nom. C'est au niveau de chaque fonction que sont définies les accointances d'un spécialiste. Par exemple, la résolution des occultations, se fera par envoi de messages au spécialiste qui aura la plus forte probabilité (connaissance fournie au système) de recouvrir partiellement l'objet émetteur. Le receveur active sa fonction d'analyse locale, vérifie si l'objet qu'il est chargé de reconnaître est effectivement présent dans la zone spécifiée par l'émetteur, et lui répond avec un degré de fiabilité. Si l'émetteur juge que cette réponse n'est pas satisfaisante, il recommence l'opération avec les autres spécialistes définis dans ses accointances. Dans le cas où aucune réponse ne convient, l'utilisateur est alerté. Enfin, chaque fonction sera utilisée avec une stratégie particulière qui pourra être spécifiée. Par exemple, l'extraction d'un objet composé nécessite un plan d'extraction et une règle d'agencement spatial des objets de base. De même, la reconstruction du réseau hydrographique se fait à l'aide de plusieurs agents. La stratégie peut consister par exemple, à ordonner leurs tâches, ou bien à utiliser un tableau noir etc....

Conclusion

D'un point de vue théorique, plusieurs aspects doivent être développés. La classification d'un objet en cours de reconnaissance, la spécification des protocoles de communication entre les différents spécialistes, et la définition d'une fonction d'évaluation qui permettra d'indiquer, en mode d'analyse locale (vérification), la fiabilité portée sur le résultat de l'analyse du spécialiste sollicité. De plus, une des propriétés que devront vérifier les protocoles de communication, sera d'éviter le bouclage à l'infini lors de la résolution des occultations (le pont qui recouvre la route, celle-ci recouvre le fleuve qui recouvre la route etc...). Enfin, une définition rigoureuse de la composition d'objets de base, aussi appelée règle de placement spatial, est à étudier.

C.1.7.1. Contrôle linéaire

par Philippe HOTTIER

En juin 1994, deux thèses ont été soutenues, l'une à l'Université Paris-7 [ABBAS], l'autre à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg [GRUSSENMEYER]. La première, surtout axée sur les principes théoriques qui sous-tendent la méthode, la seconde plus concrète et dirigée vers le contrôle d'une saisie photogrammétrique. En septembre 1994, la méthode a été très succinctement présentée au séminaire de l'Association Française de Topographie (AFT) : "Qualité de l'interprétation des images de télédétection pour la cartographie". Le travail s'est depuis poursuivi et sur certains points essentiels, les deux thèses sont d'ores et déjà dépassées.

Le problème des simulations

On rappelle que la méthode a pour but d'évaluer la "précision" de n'importe quel document cartographique en le comparant à une référence (en principe plus précise); à la différence du contrôle ponctuel, on opère non pas sur des couples de *points homologues* mais sur des couples de *lignes homologues*; l'outil de base est la distance de Hausdorff et, point essentiel, tous les paramètres de taille et forme des objets sont éliminés au moyen de simulations appropriées. Plus précisément si d_1 , d_2 et d_H désignent respectivement la distance de l'objet carte K_1 "à" l'objet-référence K_2 (d_1 est le maximum des plus courtes distances des points de K_1 à K_2), d_2 la distance de l'objet-référence K_2 "à" l'objet-carte K_1 (le max des plus courtes distances des points de K_2 à K_1) et d_H la distance de K_1 et K_2 (le maximum de d_1 & d_2), on élimine ces paramètres en calculant les *écarts standard* :

$$e_1 = \frac{d_1}{d_{10}} emq_0 \qquad e_2 = \frac{d_2}{d_{20}} emq_0 \qquad e_H = \frac{d_H}{d_{H0}} emq_0$$

avec $emq_0 = (emq_{01}^2 + emq_{02}^2)^{1/2}$ où emq_{01} et emq_{02} sont des estimations a priori, au départ très grossières, des emq carte et référence et où les quantités $\overline{d_{10}}$, $\overline{d_{20}}$, $\overline{d_{H0}}$ sont les moyennes de la distance de Hausdorff et de ses deux composantes évaluées par *simulation*.

Ce point est capital : *si ces simulations sont bien faites* on a montré que d'une part les moyennes de ces trois écarts (dénommées : "écarts-moyens standard") ne diffèrent pas, et que d'autre part ces moyennes sont un excellent estimateur de l' emq (erreur moyenne quadratique) planimétrique si la référence peut être considérée comme exacte, de l' $ecmq$ (l'écart moyen quadratique) planimétrique s'il n'en est pas ainsi. Or en juin 1994, les validations n'avaient eu lieu que sur des saisies photogrammétrique de clichés aériens au 1 : 30 000 comparées à des saisies sur clichés au 1 : 8 000 ou 1 : 17 000, et portaient soit sur des échantillons de bâti soit sur des échantillons de tronçons routiers; la méthode proposée pour les simulations était alors la suivante : étant donné un couple $K_1 K_2$ réel, on bruitait les sommets de l'objet-carte K_1 avec l'erreur de la référence obtenant ainsi un objet-carte simulé; puis après introduction de pseudo-sommets supplémentaires sur les plus longs segments de l'objet réel K_1 , de façon à égaliser le nombre de sommets de l'objet-référence, on bruitait avec l'erreur a priori de la carte (noter l'inversion...), obtenant ainsi un objet-référence simulé. Pour chaque paire obtenue l'objet-référence était alors effectivement plus compliqué que l'objet-carte.

Mais l'étude d'échantillons routiers et ferrés de la BDCarto comparés à la BDTopo a obligé à approfondir et à clarifier ce problème; les segments de la BDCarto sont en moyenne de cinq à dix fois plus longs que les segments de la BDTopo, et en appliquant le procédé précédent on obtenait une distorsion très fâcheuse entre les trois écarts standard. Le problème a été résolu de la façon suivante à l'aide d'un petit modèle qui peut paraître très rustique mais qui s'est avéré très efficace et que nous avons baptisé le "modèle G".

Dans ce modèle l'erreur cartographique ou l'erreur de saisie, d' emq plani emq_1 est somme de deux erreurs supposées non corrélées :

- une erreur de *pointé* d' emq : $\sqrt{1 - G^2} emq_1$
- une erreur de *généralisation par rapport à la référence* d' emq : $G emq_1$

G est le *facteur de généralisation par rapport à la référence utilisée*. Il est clair, par exemple, que lors d'une saisie à l'appareil de restitution il en est bien ainsi : l'opérateur substitue des segments à des arcs et pointe au mieux les extrémités de ces arcs; ou bien dans le cas d'un bâti complexe il simplifie, négligeant ou généralisant de petits détails. Mais la séduction de ce modèle vient de ce qu'il peut s'appliquer à d'autres situations : quand G vaut 1 il s'agit de généralisation pure par rapport au document référence; quand G vaut zéro il s'agit d'une numérisation des lignes du document référence avec un pas donné, voire d'un scannage auquel cas l'erreur est celle du scannage.

Les simulations s'effectuent à présent de la façon suivante :

- on part toujours du couple réel $K_1 K_2$; on bruite les sommets de l'objet-carte K_1 avec une erreur planimétrique d'emq $\sqrt{1 - G_0^2} \text{ emq}_{01}$ où G_0 et emq_{01} sont des estimations grossières de G et emq_1 , obtenant ainsi un objet-carte simulé;
- puis partant toujours de K_1 , on introduit des sommets supplémentaires et on bruite l'ensemble des sommets avec l'emq $\sqrt{\text{emq}^2_{02} + G_0^2 \text{emq}^2_{01}}$ obtenant ainsi l'objet-référence homologue.

Tant sur de pures simulations que sur un gros échantillon réel de la BDCarto la méthode a parfaitement réussi; pour des échantillons routiers ou ferrés G est voisin de 0,3, pour du bâti (saisies au 1 : 30 000 comparées à des saisies au 1 : 17 000 ou 1 : 8 000) il peut atteindre 0,8-0,9; il dépend aussi de la "régularisation" (voir infra). Bien entendu la valeur de G doit être appréciée non seulement en fonction du type d'objet contrôlé mais aussi en fonction de la référence choisie; par exemple on pourrait avoir à comparer une carte mauvaise à une carte précise de même degré de généralisation : dans ce cas, il serait rationnel d'adopter $G = 0$. Comment dira-t-on s'assurer du bon choix ? Toujours par la condition draconienne d'égalité des moyennes des écarts standard (dont la précision statistique peut être calculée); en fait il semble bien qu'une valeur très grossière de G suffise de même qu'il suffit d'une valeur très grossière des emq-carte et référence pour entreprendre les calculs.

**emq-carte : 1,5m; emq-référence : 1,5 m; facteur de généralisation : $G = 0,6$
(simulation; segment moyen carte : 70m; référence : 14 m)**

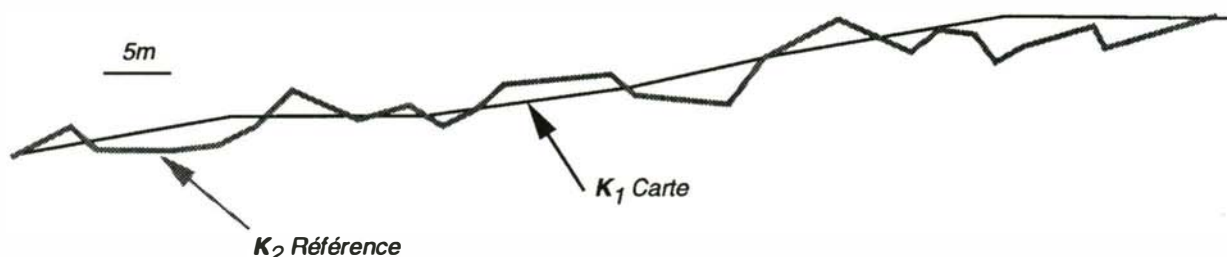


figure C.1.7.1

Donnons ici un exemple et profitons en pour critiquer une méthode qui vient d'être récemment proposée pour estimer l'emq : on tronçonne les objets homologues en n éléments identiques; un couple de points homologues est constitué des deux points ayant le même rang sur chaque objet; l'emq est alors chiffrée par la moyenne quadratique des écarts entre ces couples de points. Nous avons alors procédé aux essais suivants

Essai 1 : On a pris d'abord cinquante couples de tronçons de 1 700 mètres de long; les segments des tronçons à "contrôler" avaient une longueur de 70 mètres et ceux des tronçons-référence une longueur de 14 mètres; on a simulé une erreur de pointé définie par une emq de 15 mètres (autrement dit, on a bruité les coordonnées des extrémités des segments avec une erreur gaussienne d'écart-type (15/1,414); on a de même simulé une erreur d'emq 1,5 mètre pour les tronçons référence.

De plus pour éviter tout handicap à la méthode proposée les origines des deux tronçons de chaque couple ont été prises identiques de façon à éviter un décalage.

Sur chaque tronçon, on a défini à partir de son origine des points équidistants de 40 mètres. On a ensuite calculé pour chaque couple de tronçons l'écart-moyen quadratique (ecmq) entre les points de même rang par la formule

$$\text{ecmq} = \sqrt{\sum \frac{(x_{i1} - x_{i2})^2 + (y_{i1+1} - y_{i2})^2}{n}}$$

(qui est celle donnant l'estimation de l'emq planimétrique quand les points sont homologues)

On a trouvé pour 2 000 points en tout : $\text{ecmq} = 19.5 \text{ m}$ estimation évidemment incompatible avec 15 mètres.

Essai 2 : Avec cinquante couples de tronçons de longueur double (3 500 mètres) et le même écartement pour les points équidistants on a trouvé (4 300 points) $\text{ecmq} = 46 \text{ m}$! Ainsi le biais dépend de la longueur des tronçons....

Essai 3 : Avec les mêmes tronçons (3 500 mètres) mais avec un écartement de 20 mètres, on a trouvé (8 600 points) : $\text{ecmq} = 34.8 \text{ mètres}$! Ainsi le biais dépend de l'écartement choisi pour les points équidistants.

Essai 4 : Cette fois-ci on a pris un facteur de généralisation $G = 0,6$ et des tronçons de 3 500 mètres, les emq carte et référence conservant les mêmes valeurs; on a trouvé pour cinquante couples de lignes et 4 288 points couples de points équidistants une estimation de l'emq de... 356 mètres.

Ce résultat absurde a une explication toute simple : en cas de généralisation la ligne-référence oscille plus ou moins vivement autour de la ligne-carte et elle est beaucoup plus longue : si bien que les segments joignant les soi-disant points homologues s'allongent de plus en plus.

La méthode proposée est donc ... fautive et telle quelle à rejeter totalement; on ne voit du reste aucune raison pour laquelle la somme quadratique des écarts entre points équidistants serait un estimateur valable de l'emq planimétrique; en d'autres termes ces points ne peuvent absolument pas jouer le rôle de "points homologues".

Mais lorsqu'on traite les trois lots de tronçons par la *méthode du contrôle linéaire* (en partant d'une emq *a priori* de 20 mètres); les résultats sont *impeccables* : 15, 20₄₀ m pour les tronçons de 1 700 mètres, 15,25₃₆ m pour ceux de 3 500 mètres et 15.42₄₃ m pour le cas où $G = 0,6$!

Nous ne prétendons nullement que la méthode du contrôle linéaire est la seule qui soit valable en l'absence de points homologues; mais au moins elle semble bien d'après les nombreux essais effectués jusqu'ici (simulations et comparaisons avec le contrôle ponctuel quand celui-ci est possible) fonctionner correctement; il est possible qu'on puisse lui opposer d'autres méthodes mais aucune n'échappera au grave problème de la variation des indices de quelque nature qu'ils soient avec la forme et la dimension des objets étudiés (et certains paramètres arbitraires comme dans la méthode proposée la valeur de l'écartement entre points homologues); le seul moyen d'en venir à bout est d'employer une méthode semblable à celle qui a été développée dans le contrôle linéaire; ce n'est pas très difficile mais ce n'est pas très simple ... et oblige à un travail en profondeur.

La régularisation. Le problème du contour-nominal.

On sait que la méthode exige une *régularisation* préalable des lignes homologues : on coupe les détails discordants mais en les mémorisant, distinguant entre détails discordants mal saisis (faute) et détails discordants pour raisons diverses (parties cachées, ombres etc...).

L'estimation de l'emq se fait donc uniquement sur les tracés *en accord* et la méthode du contrôle linéaire donne au minimum deux chiffres : le taux d'accord du tracé-carte avec le tracé-référence et *pour les portions en accord* l'estimation de l'emq. La régularisation est effectuée de manière interactive à l'écran en s'aidant d'une boule de tolérance; en fait hormis les simulations pures l'ensemble de la méthode est itératif : on commence par des tolérances très larges en coupant cependant tous les détails référence hors spécification; le calcul de l'emq fournit alors une estimation déjà très satisfaisante de l'emq qu'on injecte à nouveau dans le processus de régularisation.

Une remarque pratique importante est celle-ci : quand il s'agit de tronçons (routiers par exemple) ces tronçons doivent être coupés à l'*aplomb du tronçon-carte et non l'inverse* ! C'est la solution adoptée à présent qui semble avantageusement remplacer celle préconisée dans [ABBAS, page 103]. Par ailleurs il est bon de vérifier avant les calculs que les tracés ne comportent pas plus de segments que de raison : des sommets parasite en trop grand nombre faussent en effet les simulations

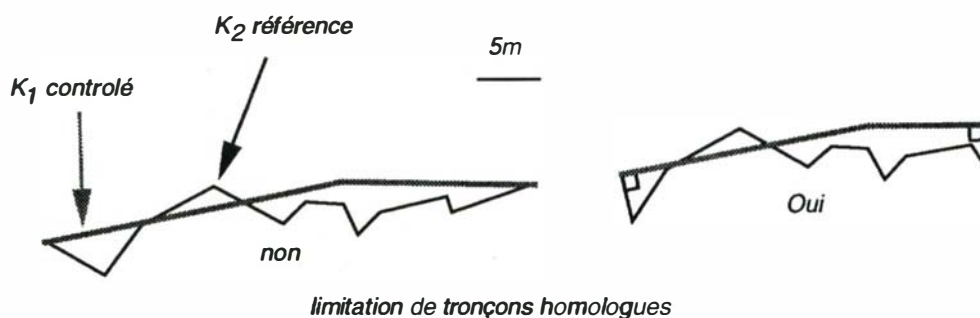
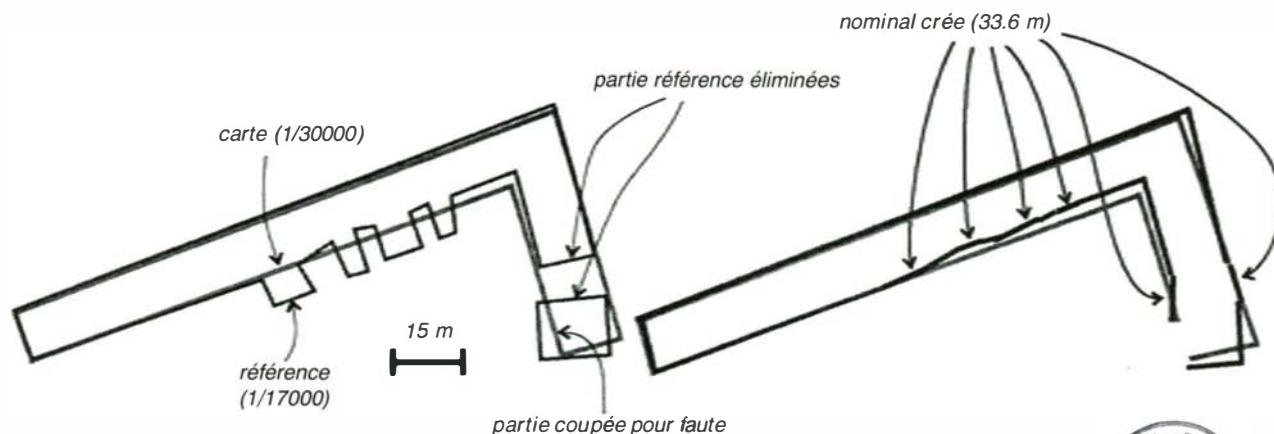


figure C.1.7.1.2

Par ailleurs on peut se poser la question suivante : ne serait-il pas préférable plutôt que d'envisager le taux d'accord du tracé-carte avec le tracé-référence d'envisager *le taux d'accord du tracé-carte avec le tracé nominal* (c'est-à-dire un tracé-référence conforme aux spécifications de saisie) ?



Après "nomination" du contour-référence le taux d'accord de l'objet-carte avec l'objet-référence est de 93%; sans nomination il est de 74%



figure C.1.7.1.3

Dans les cas où les objets-référence sont notablement plus compliqués que les objets-carte la réponse ne peut être que oui; par exemple pour tel objet (bâti saisi au 1 : 30 000; référence : une saisie au 1 : 17 000) le périmètre-carte initial vaut 320,9 mètres et le périmètre-référence 376,6 mètres; si on n'essaie pas de définir le contour-nominal on est conduit à couper 42 mètres sur le contour-carte (dont 17 mètres pour faute) et 78 mètres sur la référence (dont 16 mètres pour faute); le taux d'accord du tracé carte avec le tracé-référence est alors :

$$(320,9 - 42) / 376,6 = 74 \%$$

si nous remplaçons les parties hors spécifications du contour-référence par des segments (ce qui est très facile à l'écran) nous constatons que le tracé-carte en accord avec le tracé nominal a une longueur de (320,9-17) mètres, le tracé nominal valant 327 mètres; le taux d'accord du tracé-carte avec le tracé-nominal vaut :

$$(320,9 - 17) / 327 = 93 \%$$

La différence est extrêmement nette. Cette méthodologie semble d'autant plus s'imposer que la notion de taux d'accord tracé-carte/ tracé-référence dépend bien évidemment de la référence choisie; on objectera que la définition du "nominal" à partir d'une référence précise est sujette à un certain arbitraire; d'après les premiers essais auxquels nous nous sommes livrés il ne semble pas se présenter de difficulté pour le bâti quand on procède interactivement; il n'y en a sans doute pas non plus pour le réseau routier. Pour le réseau hydrographique, une technique de généralisation très simple (nul besoin ici d'arriver à un résultat esthétiquement satisfaisant...) serait sans doute suffisante.

Dans un tel cas — et telle sera sans doute la solution adoptée dans l'avenir— le respect des spécifications de saisie ne figurerait plus parmi les causes de tracé-carte hors tolérance; il resterait le chapitre *fautes et divers*.

Les premiers essais entrepris sur un échantillon de bâti très compliqué (centre ville Mulhouse saisi au 1 : 30 000 comparé à une saisie au 1 : 17 000) sont très séduisants :

- avec l'ancienne façon de faire (on coupait tous les détails discordants classés soit en HT (hors tolérance) *faute* soit en HT *divers*) on avait obtenu, pour les moyennes des trois écarts-standard, et le taux d'accord du tracé-carte avec le tracé-référence régularisé les chiffres suivants :

$$ems_1 = 1,56_4; ems_2 = 1,50_5; ems_H = 1,49_5 \Rightarrow ecmq = 1,51_4$$

$$\tau = 77,4 \%; \quad (HT \text{ fautes} : 3,5 \%; HT \text{ divers} : 19,1 \%)$$

- avec la nouvelle on a obtenu dans les mêmes conditions :

$$ems_1 = 1,51_4; ems_2 = 1,45_4; ems_H = 1,44_5 \Rightarrow ecmq = 1,47$$

$$\tau = 91,74 \%; \quad (HT \text{ fautes} : 6,52 \%; HT \text{ divers} : 1,74 \%)$$

Le taux d'accord est évidemment bien plus flatteur que le précédent; bien entendu la raison principale est que cette nouvelle méthode oblige à se poser en face de chaque couple d'objets la question : qu'est-ce que *le contour nominal* ? On est alors amené à éliminer des parties de contour qui étaient comptées dans le chapitre divers avec l'ancienne méthode.

Un seul essai a été fait jusqu'à présent; pour vérifier la stabilité on refait les calculs avec la première moitié du lot soit 90 objets; on a trouvé :

$$ems_1 = 1,56_6; ems_2 = 1,45_6; ems_H = 1,47_5 \Rightarrow ecmq = 1,49_6$$

$$\tau = 92,04 \%; \quad (HT \text{ fautes} : 6,14 \%; HT \text{ divers} : 1,81 \%)$$

Le taux d'accord est pratiquement le même...; c'est a priori assez étonnant mais confirme des essais faits avec l'ancienne méthode, voici déjà plusieurs mois [ABBAS pages 169 et 173]; rappelons que les détails discordants sont décelés à l'écran à l'aide d'une boule de tolérance a priori et qu'il convient de couper large.

- un dernier essai a été fait après avoir réduit le systématisme global relativement important dans cet échantillon (0,80 m en x); on a trouvé :

$$ems_1 = 1.33_6; ems_2 = 1.35_6; ems_H = 1.35_5 \Rightarrow ecmq = 1.35_6$$

$$\tau = 90.85 \% ; \quad (HT\ fautes : 7.15 \% ; HT\ divers : 2 \%)$$

On notera, fait qui semble général une meilleure cohérence des moyennes des écarts standard; autrement dit la distorsion entre ces moyennes peut avoir pour cause un systématisme global, fait qui est déjà cité dans [ABBAS]; on a noté de surplus un bien meilleur accord des indices de généralisation fait qui confirme également des remarques antérieures.

Détection du systématisme

Contrairement à ce que nous avons longtemps pensé le systématisme peut fort bien être détecté et mesuré avec précision sans qu'on dispose de points homologues, à condition cependant qu'il y ait au moins deux lignes d'orientation différente.

Au voisinage d'un point m_1 de la carte le systématisme local est défini par une translation d'amplitude T et d'angle α_S . Il s'agit de déterminer T et α_S .

Supposons pour cela que l'écart carte-référence soit imputable au seul systématisme; dans ce cas le segment-référence a_2b_2 se déduit du segment-carte a_1b_1 par la translation opposée.

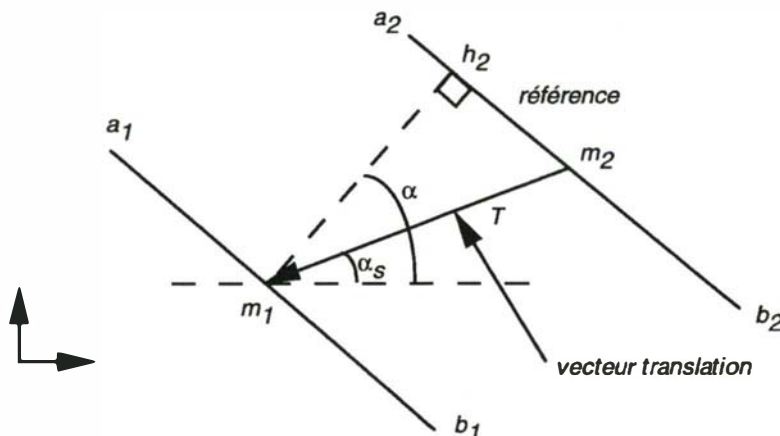


figure C.1.7.1.4

Soit h_2 le pied de la perpendiculaire abaissée de m_1 sur a_2b_2 , et α l'angle de m_1h_2 avec Ox - angle que nous pouvons toujours calculer ; soit u et v les coordonnées du vecteur m_1h_2 (toujours calculable); il vient :

$$u = - T \cos(\alpha - \alpha_S) \cos\alpha; \quad v = - T \cos(\alpha - \alpha_S) \sin\alpha$$

Si donc on possède au moins deux orientations de segments on voit qu'en principe on peut calculer T et α_S ; en effet chaque vecteur m_1h_2 fournit une équation du type précédent :

$$- \cos^2 \alpha_j (T \cos \alpha_S) - \sin \alpha_j \cos \alpha_j (T \sin \alpha_S) = u_j$$

$$- \sin \alpha_j \cos \alpha_j (T \cos \alpha_S) - \sin^2 \alpha_j (T \sin \alpha_S) = v_j$$

et la résolution par moindres carrés fournit les deux inconnues $T \cos \alpha_S$ et $T \sin \alpha_S$

Ce procédé a été expérimenté sur des simulations et des cas réels et donne d'excellents résultats identiques à ceux du contrôle ponctuel quand celui-ci est possible; dans la pratique on obtient en chaque noeud d'une grille 4 x 4 une estimation du systématisme local; le calcul est fait avant l'estimation de l'emq; bien entendu certaines précautions doivent être prises; en premier lieu une précaution numérique permettant de rejeter les cas où l'estimation est impossible : si au voisinage du noeud ij de la grille l'équation normale est:

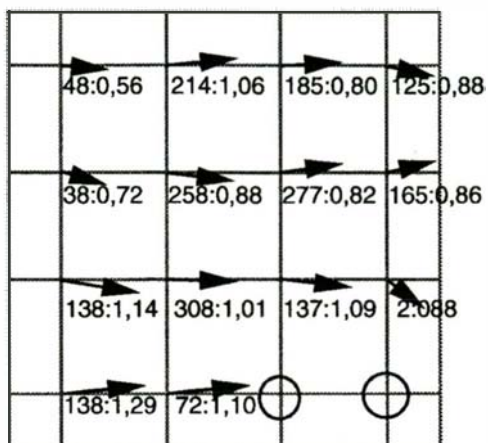
$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \cos \alpha_S \\ T \sin \alpha_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$$

on rejette les estimations correspondant à un déterminant trop petit (cas de segments parallèles), ainsi que celles pour lesquelles le rapport s_2 / s_1 de la plus petite valeur propre à la plus grande est inférieur à 0,15.

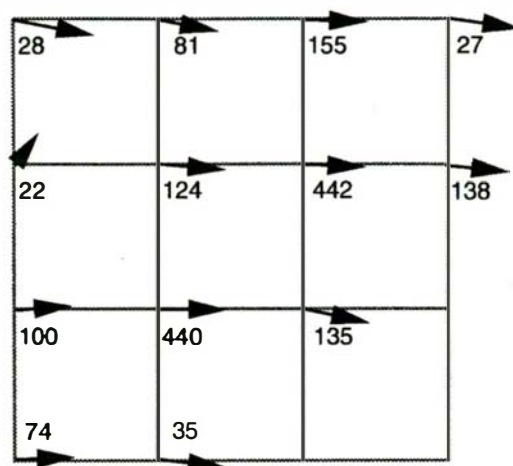
En outre on vérifie qu'en chaque noeud le systématisme local diffère significativement de zéro; il faut pour cela que son amplitude T_{ij} excède une tolérance tol définie par :

$$tol = \sqrt{-\ln risq} \frac{emq}{\sqrt{n_{ij}}}$$

où $risq$ est le risque de première espèce, n_{ij} le nombre de segments-référence ayant une extrémité au voisinage du noeud ij et emq une estimation a priori de l'emq planimétrique; comme le nombre n_{ij} peut être assez faible nous prenons ici un risque assez élevé ($10 > \%$); on ne peut alors conclure à un systématisme que si en plusieurs noeuds (au moins deux) T_{ij} excède tol .



Détection du systématisme (1m en x) à partir des lignes homologues
 $emx=0,924m$; $emy=0,02m$
 $emq\ plani=1,91m$



Détection à partir de couples de points homologues
 $emx=0,92m$; $emy=-0,02m$
 $emq\ plani=1,91m$

figure C.1.7.1.5

Dans le cas de la figure C.1.7.1.5 on avait introduit sur les 190 objets de l'échantillon un systématisme en x de 1 m et un bruit de 1,5 mètre d'emq; la méthode décrite a donné 0,91 mètre pour le systématisme, soit exactement la même valeur que celle fournie par le contrôle ponctuel; on a noté d'autre part qu'en corrigeant le systématisme on obtenait avec une seule réitération 1,5303 m d'emq (les moyennes des trois écarts standard étant 1,56, 1,51, 1,51); pour le contrôle ponctuel il fallait aussi une réitération.

C.2.1. Mise au point et exploitation des données d'une caméra à comptage de photons pour l'astronomie

par Christian THOM

Contexte - objectifs

Aucune recherche n'est évidemment entreprise à l'IGN sur les caméras à comptage de photons, toutefois un certain parallèle peut être établi avec la caméra aérienne numérique (sauvegarde rapide de grande quantité de données, traitement d'image, gestion de processus temps réel).

Par contre, hors IGN, l'utilisation de caméras à comptage de photons se répand en astronomie, notamment en ce qui concerne l'interférométrie optique.

Le groupe **AIRI**, sous la direction de R. Foy, anciennement du Département d'Astrophysique Stellaire et Galactique, et maintenant de l'Observatoire de Lyon, en collaboration avec l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), a donc entrepris il y a quelques temps la réalisation d'une telle caméra, dite CP40, qui est maintenant utilisée pour des buts scientifiques dans plusieurs observatoires.

C'est surtout pour l'astronomie à haute résolution angulaire que le développement de caméras à comptage de photons est primordial, du moins pour les observations faites sur terre et non dans l'espace, car pour pallier les distorsions dues à l'atmosphère il est nécessaire d'observer les sources avec des temps de pose courts, et dans des bandes spectrales étroites, et donc de pouvoir détecter des flux très faibles.

Dans l'attente de télescopes spatiaux d'usage général, elles restent le seul moyen d'obtenir des observations à haute résolution, par les techniques d'interférométrie des tavelures, et de synthèse d'ouverture optique, de déconvolution par analyse du front d'onde.

Résultats

Comme en 1993, les travaux de l'année 1994 ont été assez perturbés par les problèmes financiers de l'ESO (European Southern Observatory) concernant la réalisation du VLT (Very Large Telescope), stoppant les projets de réalisation de la caméra à haute résolution angulaire. La caméra à comptage de photons existante (CP 40) semblant à peu près opérationnelle et mon intervention dans ses évolutions futures ne paraissant pas nécessaires, je propose d'interrompre ici cette action de recherche, en attendant une évolution quelconque de la situation. Je maintiendrai toutefois une veille dans ce domaine, à cause de la réelle similarité de cette recherche avec celle liée à la caméra numérique, tant au niveau des problèmes rencontrés que de la nature des solutions à y apporter.

Publications

[DEVANEY ET AL 94] M.N. Devaney, E. Thiébaud, R. Foy, A. Blazit, D. Bonneau, J. Bouvier, B. Debatz & Ch. Thom : *The Ha environment of T Tau resolved by speckle interferometry*, Astronomy and Astrophysics, 1er juin 1994.

C.2.2. Mise en exploitation de la station LASER ultra-mobile

par Michel KASSER

Contexte

Les travaux sur la Station Laser dite "Ultra-Mobile" (en abrégé SLUM), menés avec le soutien de l'OCA, du CNES et de l'INSU, ont commencé en 1991 sur la base d'un cahier de charges assez nouveau par rapport aux projets qui avaient vu le jour jusque là : télescope de petite taille (diamètre treize centimètres), tourelle dérivée d'un théodolite motorisé KERN, ensembles électroniques regroupés dans des containers faciles à déplacer, formant un ensemble de faible coût de transport (dix colis, un total de 330 kilos). Les différents sous-ensembles spécifiés ont été réceptionnés en 1992 et 1993, avec une difficulté importante au niveau de la tourelle, dont le constructeur a alors pratiquement disparu du marché à la suite de restructurations lourdes dues à la crise industrielle. Les problèmes essentiels au début 1994 concernaient donc la fin de la mise au point de la tourelle, dont le constructeur ne s'avérait pas capable d'assurer la mise au point finale. Par ailleurs, l'ensemble de la SLUM marchait déjà de façon correcte, puisque plusieurs poursuites de satellites avaient eu lieu avec succès, mais avec de grandes difficultés de fonctionnement.

Objectifs scientifiques

Ce sont ceux du SLR en général, c'est-à-dire ceux permis par une orbitographie très précise d'un satellite extrêmement compact et donc peu sensible à des forces non gravitationnelles : étude de la rotation terrestre, du champ de pesanteur terrestre et de ses variations à très long terme, positionnement absolu. Dans notre cas, l'objectif pour lequel nous avons spécialement souhaité parvenir à une maîtrise de la télémétrie laser satellite à faible coût de fonctionnement est surtout la possibilité d'obtenir facilement des références d'altimétrie absolue (référencées sur le centre des masses de la Terre), qui sont indispensables pour étudier les composantes verticales des phénomènes tectoniques.

Travaux de l'année 1994

Une analyse a été menée pour comprendre l'origine des dysfonctionnements de la tourelle. Successivement ont été incriminés des aspects mécaniques puis informatiques. Il s'avère après de nombreuses consultations (essentiellement un spécialiste du CNES ainsi qu'une société de service spécialisée en asservissements), que la mécanique présente des défauts qui compliquent le travail, même s'ils ne sont pas absolument rédhibitoires. Et par ailleurs, les sources des logiciels d'asservissements ainsi que les schémas électroniques détaillés ont été obtenus après beaucoup de difficultés, montrant aussi que les logiciels de pilotage comportent de graves imperfections. Une étude mécanique a été entreprise afin d'augmenter considérablement la raideur de la motorisation de l'axe des tourillons et en limiter les jeux, et ceci sur ce seul axe pour vérifier qu'un bénéfice significatif est obtenu avant de traiter le second axe, beaucoup moins accessible. Cette nouvelle transmission a été réalisée, elle est en cours de tests.

Suite de cette recherche

Nous avons considéré que la participation du laboratoire LOEMI ne devait pas se poursuivre au delà de cette phase, et en 1995 seul l'OCA continuera le travail de façon continue, avec de simples aides ponctuelles du laboratoire LOEMI si besoin est. Les recherches de l'IGN en matière de télémétrie laser satellites se poursuivent néanmoins avec l'étude d'une nouvelle technologie de mesure, complètement affranchie des biais de mesure que rencontrent toutes les stations dans le monde à l'heure actuelle.

C.2.3. Prototype d'une caméra aérienne numérique

par Christian THOM

Contexte

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

Objectifs

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

Activités - résultats

Amélioration de l'optique et de l'ergonomie : Les travaux entrepris cette année sur la caméra numérique aérienne ont porté sur l'amélioration de la qualité de l'optique et sur l'ergonomie de l'ensemble de prise de vue embarqué. En ce qui concerne l'optique, le vignettage a été amélioré par l'utilisation d'un filtre qui remplace maintenant la plupart de ceux qui étaient utilisés auparavant. D'autre part, nous sommes actuellement limités par l'obturateur qui ne permet pas des temps de pause inférieurs à 20 ms, d'où un filé relativement important et de plus, l'objectif Nikon 24 millimètres grand public que nous utilisons a des performances limitées en terme de résolution et une courbure de champ importante qui limite la qualité des images. La conception et le développement d'un objectif 24 millimètres spécialement adapté à la caméra ont donc été confiés à la société Optique. En ce qui concerne l'ergonomie du système embarqué, les améliorations apportées au système ont permis de réduire son poids et son volume en remplaçant le moniteur vidéo CRT par un moniteur vidéo à écran plat déporté permettant un contrôle plus aisé des images acquises. La capacité de mémoire de masse a été augmentée par le remplacement du disque 1 Go par un disque 4 Go amovible qui permet en vol d'avoir une capacité illimitée (il suffit d'avoir suffisamment de disques 4 Go en réserve), le système d'exploitation étant installé désormais sur un disque fixe de plus petite capacité.

Calibration radiométrique : L'achat d'une sphère intégrante a permis d'effectuer la calibration radiométrique de la caméra. Les logiciels nécessaires ont été mis au point, permettant la correction de la variabilité de la sensibilité des pixels, améliorant ainsi très sensiblement le rapport signal à bruit dans les images [THOM et al 94a], qui atteint maintenant 90, et corrigeant le vignettage de l'optique, ce qui permet d'obtenir une précision de 1% RMS environ sur les radiométries.

La distorsion géométrique de l'objectif a été mesurée par un procédé automatique, qui a permis aussi d'avoir une idée quant à la précision globale des pointés sur une image, celle-ci atteignant environ 1/2 pixel RMS après correction des systématismes. Ceci reste tout de même à affiner, car les calculs ont été faits sur des images à résolution dégradée d'un facteur deux. De même, seuls les systématismes radiaux ont été pris en compte. Enfin, une méthode originale a été mise au point pour mesurer la précision de la localisation des photocentres des pixels à l'intérieur d'une ligne. Celle-ci a été trouvée meilleure que le quarantième de pixel.

Compensation de filé pour les prises de vue à basse altitude : Pour les prises de vue à basse altitude, nous sommes limités par les temps de pause relativement longs qui produisent un filé important. L'utilisation de l'objectif Thévou avec des temps de pause minimum de cinq ms permettra sans autre modification de supprimer le filé des prises de vue à 4 000 mètres mais ne règle pas le problème posé par les prises de vue à plus grande échelle. Après une étude plus approfondie des fonctions de bas niveau qui pilotent la caméra, une compensation de filé électronique (par le décalage des lignes en cours de prise de vue) a pu être installée dans le programme de gestion de la caméra. L'essai de ce programme en vol a été perturbé par des problèmes annexes mais a tout de même permis de détecter des irrégularités du fonctionnement et de corriger le programme de compensation en conséquence.

Mission aérienne : Une mission aérienne [THOM et al 94b] a été faite fin juillet dans sur une zone différente de celle initialement prévue, à cause des conditions météo peu favorables (nuages). Elle a permis une prise de vue classique (focale 24 millimètres, 4 000 mètres, 60% de recouvrement longitudinal) vers 12 heures sur l'axe Chalon-Tournus, puis vers 19 heures 30 une prise de vue à la même altitude sur la même zone mais avec un objectif 50 millimètres imposant l'utilisation de la compensation de filé. Cette mission a mis en évidence les problèmes posés par les chocs et vibrations auxquels est soumis l'équipement pendant le transport et le vol. Néanmoins, l'expérience a permis d'apprécier que la qualité des images est nettement meilleure qu'à la précédente mission grâce à l'utilisation d'un filtre unique et à la correction radiométrique. Malheureusement, les vibrations n'ont pas permis de réaliser des images correctes avec le 50 millimètres et donc pas non plus d'apprécier la qualité de la compensation de filé.

Industrialisation

Nous avons rédigé au printemps un document [IGN/SR/LOEMI 94] qui est une enquête destinée à connaître les besoins des utilisateurs potentiels d'une caméra aérienne numérique pour la photogrammétrie. L'Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales (OEEPE) s'est chargée de la diffusion de ce document auprès de ses membres. Un certain nombre de personnes intéressées par ce projet d'industrialisation ont répondu à cette enquête qui avait pour but de définir les caractéristiques d'une caméra convenant au plus grand nombre afin d'établir un cahier des charges pouvant être confié à un ou des industriels. Une réunion s'est tenue les 28-29 septembre 1994 à l'IGN à Saint-Mandé, la première journée étant consacrée à débattre des spécifications à donner à une telle caméra alors que la deuxième journée fut une rencontre entre ces utilisateurs potentiels et des industriels venus présenter leur savoir-faire et apporter leur avis technique sur les spécifications définies la veille.

Les conclusions de cet atelier ont été que la communauté des photogrammètres n'est pas encore familiarisée avec les spécificités des capteurs numériques, et n'est donc pas prête à financer la réalisation industrielle d'un capteur. Elle soutient néanmoins nos travaux, et souhaiterait disposer d'images aériennes numériques pour évaluation. Il n'en reste pas moins que nous demeurons seuls en ce qui concerne la réalisation d'un nouveau capteur répondant aux spécifications.

Suites

Le travail sur le prototype se poursuivra par le test de la nouvelle optique, en laboratoire puis durant un vol qui permettra aussi en principe de ramener des images à plus grande échelle. D'autre part, la veille concernant l'apparition sur le marché d'une caméra nous convenant continuera, et si elle n'aboutit pas, nous envisageons pour le milieu de l'année, la construction d'un nouveau prototype répondant mieux à nos spécifications, probablement à base d'un capteur plus petit.

Publications

[JURVILLIER et al 94] I. Jurvillier & Ch. Thom : *Caméra numérique de grand format pour les prises de vue aériennes à l'Institut Géographique National*. Bulletin SFPT, n° 132, pp. 7-20.

[THOM et al 94a] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Geometrical and radiometrical calibrations of a large format aerial digital camera designed for photogrammetry*, ERIM Conference, Strasbourg, 12-15 septembre 1994.

[THOM et al 94b] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Rapport sur la mission Caméra Numérique du 21 Juillet 1994*, IGN, Service de la Recherche, rapport interne Laboratoire LOEMI, août 1994.

[IGN/SR/LOEMI 94] *Aerial Digital Camera for Photogrammetry Survey of Users Requirements and Suggested Specifications*, Service de la Recherche, rapport interne Laboratoire LOEMI, mars 1994.

C.2.4. Exploitation cartographique des images radar

par Sylvia SYLVANDER et Patrick GIGORD

Contexte - objectif

Cette action de recherche pluriannuelle a pour objectif d'évaluer les possibilités cartographiques offertes par l'imagerie satellitaire radar : fabrication de spatio-cartes, extraction manuelle et/ou automatique d'informations planimétriques et/ou altimétriques....

Les deux ingénieurs affectés à cette action de recherche travaillent en lien étroit avec la production au sein d'IGN-Espace qui devient l'unité utilisatrice des logiciels développés dès que les applications sont jugées opérationnelles.

Activités - résultats - perspectives

Tendance générale : Les objectifs de l'année 1994 ne sont que partiellement atteints. La raison majeure concerne le potentiel humain disponible : deux ingénieurs à plein temps étaient prévus; Sylvia Sylvander n'a pu y consacrer que huit mois, Patrick Gigord six mois.

Spatiotriangulation : La spatiotriangulation dédiée ERS a été intégrée à la chaîne de production d'IGN-Espace en octobre 1994. Elle a fait l'objet d'une validation sur de petits blocs. Le résultat le plus intéressant exploite la bonne localisation a priori d'ERS-1 et concerne la détermination d'un canevas de points par spatiotriangulation, à partir de couples stéréoscopiques montant/descendant. La précision de localisation absolue constatée sur huit couples est comprise entre 28 et 51 mètres, la cohérence interne est de vingt mètres, en planimétrie, cinq mètres, en altimétrie. Les applications potentielles sont nombreuses : recalage d'interférogrammes ou d'images optiques, rattachement de systèmes géodésiques.

Une étude partiellement financée par la CEGN nous conduira à traiter vingt six autres couples. En outre, nous espérons confirmer la bonne maîtrise de la spatiotriangulation ERS dans le cadre d'un projet de couverture de la Guyane française en spatio-cartes, qui nous conduira à traiter un bloc de vingt images.

Géocodage/Filtrage : Des essais d'algorithmes de filtrage rustiques ont été réalisés. Ils confirment qu'aucune recette miracle ne permet à la fois de conserver le peu d'éléments linéaires visibles sur ERS et de diminuer significativement l'effet du speckle.

Les pistes à explorer en 1995 concerneront la combinaison multitemporelle et l'application de filtres adaptatifs plus sophistiqués. Dans ce contexte un projet de test du logiciel d'amélioration d'image MAPSAT (Cril ingénierie) a été soumis au CNES (programme AVALSAR) pour financement partiel.

Un algorithme de rééchantillonnage spécifique au radar (multivue) et particulièrement adapté à l'édition de spatio-cartes au 1 : 200 000 est en cours d'expérimentation.

Une collaboration est prévue avec A. Baudoin (LCT Montpellier) sur la correction radiométrique des effets du relief.

Génération de modèles numériques de terrain à partir d'interférogrammes : Les résultats acquis dépassent les objectifs et sont encourageants. La précision altimétrique peut atteindre trois mètres en moyenne quadratique mais est fortement conditionnée par les artefacts de phase et la variabilité de la cohérence des interférogrammes en fonction du paysage. Ces limitations compliquent le discours commercial sans interdire une future production opérationnelle.

Dans le premier cas, il est difficile d'expliquer que le rendu du modelé de terrain puisse être bon sans que l'on maîtrise parfaitement la précision absolue.

Dans le second cas, l'examen a posteriori de l'interférogramme est indispensable pour localiser les zones de qualité dégradée. Il faut donc trouver un compromis entre les exigences du client et le coût des corrections interactives avant même d'avoir pu estimer ce dernier.

Si l'origine météorologique des artefacts est confirmée, il semble exclu de pouvoir maîtriser et corriger ce type de défauts. Par contre, nous espérons accroître la fiabilité de l'algorithme de déroulement de phase et limiter l'influence de la perte de cohérence.

Génération de modèles numériques de terrain à partir de couples stéréoscopiques : Après analyse, les potentialités du logiciel SMART vis à vis de l'imagerie satellitaire radar sont jugées trop limitées pour justifier une expérimentation lourde : production opérationnelle impossible, apport spécifique limité à l'analyse de l'acuité stéréoscopique.

L'adaptation à l'imagerie ERS du corrélateur DAUPHIN de l'IGN était prévue, elle est reportée à 1995. Ce retard n'est pas dramatique dans la mesure où ERS n'offre pas de configuration stéréoscopique satisfaisante ; par contre il faudra être prêt pour RADARSAT à la fin 1995.

Expertises pour le CNES : Le CNES a organisé en novembre 1994 un séminaire destiné à faire le point sur l'état de la recherche en France, concernant les applications radar satellitaires, et de proposer un plan d'action à l'horizon de trois à cinq ans. La tâche de rapporteur du thème cartographique nous a été confiée ; ce travail nous a conduit à établir de précieux contacts qu'il faudra valoriser.

Notre participation aux travaux du Groupe Accès Tout Temps (définition des missions futures) se limite pour l'instant aux réunions du groupe de travail. Des expériences de photo-identification sont prévues en 1995 pour préciser le lien entre résolution et contenu planimétrique.

Publications

[GIGORD 94] P. Gigord : *Présentation d'un rapport sur le thème cartographie* dans le cadre du séminaire de prospective sur l'imagerie radar à Synthèse d'Ouverture organisé par le CNES, Toulouse (F), novembre 1994.

[SYLVANDER, GIGORD 94] S. Sylvander & P. Gigord : *Exploitation Tridimensionnelle d'Images ERS1*, Journées "Cartographie radar" de la SFPT, Nice (F), novembre 1994, article à paraître dans le prochain bulletin (avril 1995).

[SYLVANDER, GIGORD 95] S. Sylvander & P. Gigord : *Exploitation des Images radar ERS1 : les Premiers Résultats*, Colloque Franco-Allemand sur l'Observation de la Terre, Bonn (D), 18-19 janvier 1995.

C.3.1. Introduction

par Jean-Philippe LAGRANGE

Comme les années précédentes, les efforts ont porté sur la généralisation et le placement des écritures pour environ 60% et sur les bases de données géographiques (modélisation et gestion des données) pour le reste.

Le second groupe de recherches doit déboucher pour l'essentiel à des recherches à relativement long terme, l'industrialisation finale reposant entièrement sur d'éventuels partenaires industriels et en aucune façon sur l'équipe de recherche. L'objectif est ici avant tout d'étudier des problèmes de fond (notamment de modélisation), et de développer des techniques susceptibles d'être ensuite reprises dans des outils du commerce. L'année 1994 a été marquée par les grandes évolutions suivantes :

- l'action de recherche Bases de Données Orientées Objets est close en fin d'année, les développements portant sur GéoO₂ se sont limités à l'intégration de modules additionnels (superposition...) et à la mise à jour du manuel. Le noyau de GéoO₂ ne devrait plus évoluer de façon sensible à l'avenir (hormis peut-être en ce qui concerne le type abstrait de donnée Geometry) mais être utilisé comme base pour d'autres recherches. Parallèlement le laboratoire a acquis le SIG Smallworld qui est désormais utilisé concurremment à GéoO₂ en fonction des recherches menées,

- les études sur le multi-échelles se sont développées en considérant davantage de thèmes, en utilisant GéoO₂ comme support, sauf pour les études liées au PSIG, lesquelles ont fait appel à Smallworld,

- de même les études sur la gestion de l'historique ont connu un développement significatif, conduisant à la mise œuvre d'un prototype pour la partie descriptive des données dans GéoO₂,

- les recherches sur la précision géométrique des données ont permis d'affiner les questions de modélisation de la précision, la manipulation de telle modélisation devant être abordée en 1995.

En ce qui concerne le premier groupe de recherche, l'année 1994 a vu la mise en place de deux nouvelles actions de recherche (placement des toponymes et modélisation pour la généralisation) et l'émergence et l'affirmation de quelques principes pour ces recherches. La création des nouvelles actions de recherche répondait au développement des recherches et visait à mieux répartir les différents domaines de travail en lots plus petits. Il en ressort une analyse plus fine et plus systématique d'une approche pour la généralisation (s'appuyant sur l'utilisation de représentations intermédiaires, voir infra) et pour le placement des écritures (systématisation de la stratégie employée jusqu'alors, ce qui devrait permettre à terme une harmonisation globale). Au terme de cette année :

- une automatisation poussée d'opérations comme la simplification (par adaptation automatique aux éléments considérés) et des débuts d'automatisation d'opérations complexes (comme l'amplification ou la caricature) sont en vue. Ces perspectives reposent à la fois sur les progrès en matière de segmentation des éléments et d'analyse des formes et sur les outils de transformation en cours de développement ;

- d'une façon générale l'équipe dispose maintenant d'une bonne base conceptuelle (originale et reconnue) et de premiers outils ;

- en ce qui concerne la résolution des conflits, et plus largement la prise en compte des facteurs contextuels, de premiers outils sont maintenant disponibles pour propager l'effet d'une action (ce qui limite l'apparition des conflits) et dans l'ensemble le sujet approche de la maturation;

- enfin l'automatisation du placement des écritures continue à progresser, de premiers éléments sont déjà disponibles pour la production (écritures horizontales) et l'industrialisation des outils de placement des noms conventionnels de routes et des kilométrages devrait suivre à court terme.

Par ailleurs, le laboratoire a poursuivi de nombreux contacts et échanges avec d'autres centres de recherche, dans le cadre du Programme national sur les SIG (axes A, B et C), dans le cadre de projets européens (projets Esprit BRA-Amusing et GéoO₂ DIS, projet Eureka GENEGIS) et de groupes de travail mais aussi en accueillant des chercheurs invités (chronologiquement les professeurs Robert Weibel, Université de Zürich (CH), Nicholas Christman, Université de Washington à Seattle (USA), et Robert McMaster, Université du Minnesota (USA)).

C.3.2. Modélisation temps et espace. Gestion de l'historique.

par Serge MOTET

Contexte

Cette action s'inscrit dans l'axe A du Programme national SIG (gestion de l'espace et du temps); elle a été présentée aux Journées Cassini à Lyon [LATARGET, MOTET 94]. Elle fait suite à une étude à l'IGN sur les bases de données de grande taille.

Elle intéressera l'IGN lorsque des mises à jours de routine devront être réalisées. Cela impliquera une conservation des archives, la diffusion de mises à jours et une ouverture vers les applications de simulations sur des tendances.

Travaux réalisés

Il s'agit d'études préalables qui ont permis de préciser les pistes de recherche, de proposer un modèle de données rudimentaire et de tester ce modèle dans un prototype.

Il a été décidé de s'orienter vers l'étude des mutations (ou changement ou transformation) et de mettre de côté l'approche par version qui est pourtant la plus répandue. Ce choix est motivé par les missions de l'IGN qui l'amènent à suivre les mutations du terrain. Il découle de ce suivi une documentation qu'il faut gérer.

Un premier modèle a été proposé [LATARGET 94]. Il ne concerne que le niveau descriptif. Les mutations élémentaires sont donc simples : création, suppression, changement de valeur.... Chaque mutation appartient à deux séquences : l'une regroupe ce qui vient de la même source de documentation et la seconde forme une transaction (respectant les contraintes d'intégrité d'une base de données SGDB et assure donc le maintien de la cohérence de la base).

Un prototype en orienté objet fonctionnant sur GéO₂ a permis une réalisation de ce modèle [MACH 94]. Des méthodes de recherche d'un état à une date donnée ont été programmées.

Conclusion

Le prototype permet d'envisager la conception et la réalisation de mutations au niveau topologique et géométrique. Les recherches sont en cours pour ce deuxième aspect, ce qui conduira à un modèle complet des mutations.

Publications

[LATARGET 94] S. Latarget : *La prise en compte du temps dans les SIG*; IGN, ENSG, mémoire de DEA-SIG 1994.

[LATARGET, MOTET 94] S. Latarget & S. Motet : *Gestion de l'historique de l'information localisée par un journal*, Journées Cassini, Lyon (F), 1994.

[MACH 94] C. Mach : *Gestion d'historique pour données géographiques*, DESS-AIST, 1994.

C.3.3. Base de données multi-échelles

par Laurent RAYNAL

Contexte

Le passage de la carte à la base de données géographiques remet en cause des références établies dans le domaine cartographique. En effet, la carte rencontre des limitations que la base de données géographiques n'a potentiellement pas. Par exemple, la carte est nécessairement restreinte à une échelle de représentation et à une zone géographique particulière (déduite de l'échelle de représentation et de la taille de la carte). Tandis qu'une base de données géographiques peut couvrir une large gamme d'échelle et n'est pas limitée géographiquement (pas de coupure, pas de format).

Or, à l'heure actuelle, les bases de données géographiques s'apparentent trop à des cartes existantes numérisées, d'une part parce que l'opération de généralisation cartographique est largement manuelle et d'autre part, parce que les rythmes de saisie et de mise à jour diffèrent. Pour tirer parti des possibilités de la base de données géographiques, il faut donc comprendre l'influence de l'échelle dans la définition de la base de données géographiques. Or l'échelle n'est pas seulement une notion mathématique (rapport entre la distance réelle et sa représentation sur la carte) mais désigne plus généralement le niveau d'analyse des données. Ainsi, concevoir une base de données à une échelle, c'est spécifier tout ce que l'on peut percevoir à cette échelle, autrement dit, en topographie, tout ce que l'on peut discerner dans le paysage et que l'on pourra reporter sur une carte à cette échelle.

Activités

L'objectif de cette action consiste donc à regrouper et manipuler dans une même base de données des informations saisies à des échelles différentes. Cela nécessite de se doter d'un modèle de données pour relier et graduer les bases de données existantes tant en terme de schéma de données qu'en terme de résolution géométrique. Quelques travaux expérimentaux ont été menés suivant ces voies en 1993 : sur la partie sémantique [RAYNAL 93], [TU 94] et sur la partie géométrique [STRICHER 93]. Ces tests nous ont fait sentir la complexité du problème du fait de la grande diversité des données de départ. Aussi, en 1994, les travaux se sont concentrés sur l'aspect sémantique à la fois en interne sur la plate-forme GÉO2, et dans le cadre du Programme de recherche sur les SIG (sous-axe B1 appelé Multi-Echelles).

En interne : Devant les difficultés à constituer, maintenir et exploiter une seule base de données de précisions sémantique et géométrique maximales, l'IGN a décidé de produire plusieurs bases de données en fonction des séries cartographiques à réaliser. Parmi elles, la BD Carto permet la cartographie au 1 : 100 000 et la BDTopo permet la cartographie au 1 : 25 000. Par conséquent, le rapprochement de deux jeux de données provenant de ces deux bases, constitue un bon support d'expérimentation pour la spécification d'une base de données multi-échelles. La base de données multi-échelles jouerait alors le rôle de base de données de référence, regroupant les différents éléments du paysage et conservant plusieurs représentations graphiques de ceux-ci (étant donné les écarts de résolution).

En premier lieu, un article relatant les diverses expériences de 1993 a été rédigé et présenté en avril au cours de la conférence EGIS/MARI'94 [RAYNAL 94a] et aux Journées de la Recherche de l'IGN [SCHORTER 94]. Cependant, dans la perspective d'un traitement complet des bases de données, un examen approfondi des spécifications de contenu a été entrepris afin de qualifier les correspondances sémantiques entre les entités des différentes bases. Le thème administratif a pu être traité et même constitué (élimination des redondances). En revanche, les thèmes routier et hydrographique ne font l'objet actuellement que d'un regroupement partiel. Aussi, une thèse a débuté fin 1994 pour exprimer les différentes relations (relation de généralisation sémantique, d'abstraction sémantique) entre les données.

Dans le cadre du PSIG : Le groupe de l'axe B1 "Multi-échelle" du PSIG rassemble des géographes, des statisticiens et des informaticiens. Or, la gestion de données à différentes échelles suscite une formulation différente suivant les disciplines : en géographie, on parlera de niveaux d'organisation spatiale; en informatique, de relations hiérarchiques; en statistique de hiérarchie de partitions. Pourtant, une convergence apparaît en termes d'outils et de méthodes : ce sont les mêmes données qui sont manipulées. La démarche poursuivie consiste donc à formaliser les savoir-faire, à mettre en évidence les problèmes représentatifs de chaque classe d'utilisateurs puis à concevoir le développement d'outils génériques.

Un certain nombre d'axiomes ont été posés, afin de définir le contexte de l'étude. En premier lieu, on se place dans un espace de géométrie euclidienne (définition de la notion de distance). Puis on considère une partition de l'espace sous la forme de polygones disjoints, ni chevauchants, ni inclus. Enfin, chaque polygone porte des attributs de nature quantitative (population, surface utile...) et/ou des attributs de nature qualitative recodés numériquement (1 <-> ...). Ainsi, des polygones plus grands peuvent être créés par jonction de polygones élémentaires contigus. Alors, des informations peuvent être associées à chaque niveau de l'arborescence. L'opérateur d'agrégation consiste à transférer l'information d'un niveau inférieur vers un niveau supérieur, ce qui n'est pas sans incidence statistique (modification de distribution spatiale).

Pour gérer cette arborescence d'entités aréales, un modèle de données spatiales hiérarchiques et un opérateur d'agrégation ont donc été définis. Puis plusieurs expériences ont été menées dans le groupe pour transposer ce travail théorique. Par exemple, le laboratoire COGIT a utilisé le SIG Smallworld [DERRAC 94].

Suites

Le travail de modélisation des correspondances entre les données perçues à des échelles différentes se poursuit en interne et devrait permettre la constitution d'une base de données intégrée pour plusieurs thèmes topographiques.

En ce qui concerne le PSIG, l'année 1995 est consacrée à l'opérateur de désagrégation, c'est-à-dire la mise en correspondance de deux découpages spatiaux incompatibles (limites de quartiers et de zones de bureau de votes par exemple) et au transfert d'informations entre ces thèmes.

Publications

- [RAYNAL 93] L. Raynal, B. David & G. Schorter : *GéO₂ et le multi-échelles*, article paru dans les actes du "Pôle Bases de Données Spatiales", décembre 1993.
- [STRICHER 93] N. Stricher : *Base de données multi-échelles : Association géométrique entre la BDCarto et la BDTopo par mesure de la distance de HAUSDORFF*, mémoire de DESS SCHM, Paris-11, 1993.
- [DERRAC 94] C. Derrac : *Test d'implémentation de l'opérateur d'agrégation sur le SIG Smallworld, pour un modèle hiérarchique de données traitant de zones végétales des Hautes-Alpes*, mémoire de DEA-SIG, Paris-7, septembre 1994.
- [RAYNAL 94a] L. Raynal & N. Stricher : *Base de données multi-échelles : association géométrique des tronçons de route de la BDCarto et de la BDTopo* EGIS/MARI'94, pp. 300-310, avril 1994.
- [RAYNAL 94b] L. Raynal, P. Dumolard, M. Scholl, G. Tassart, G. d'Aubigny, D. Larcena & C. Weber : *Gestion de données multi-échelles*, rapport d'avancement de l'axe B du PSIG, juin 1994.
- [SCHORTER 94] G. Schorter : *GéO₂ : base de données multi-échelles*, Résumé pour les Journées Recherche de l'IGN, avril 1994.
- [TU 94] T. Tran : *La base de données multi-échelles : fusion des bases cartographique et topographique dans un SGBD Orienté-Objet*, mémoire d'ingénieur CNAM, janvier 1994.

C.3.4. Modélisation et gestion de la précision de localisation dans les bases de données géographiques

par François VAUGLIN

Contexte

Les trois primitives géométriques des Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont généralement les points, les lignes, et les surfaces. Généralement, le point est un couple de coordonnées (x, y) ou un triplet de coordonnées (x, y, z); la ligne est une liste de points ordonnés et reliés par des segments; et les surfaces sont des listes de lignes.

La localisation de certaines informations géographiques est difficile à spécifier (difficulté d'identification des marais, des zones d'occupation du sol...); ou il peut être difficile d'attribuer une valeur quantitative étant donnée la résolution des données (par exemple, un carrefour en patte d'oie dont l'empatement maximal est inférieur à 50 mètres n'est pas reporté dans la BDTopo); mais également, et c'est notre préoccupation, l'imprécision des coordonnées est liée aux processus de saisie de l'information: considérant que les coordonnées des objets sont des réalisations d'un processus de mesures, un même point saisi deux fois n'aura jamais exactement la même valeur. Toutefois, connaissant l'échelle de saisie, les spécifications, la source de saisie, et le voisinage du point considéré, l'opérateur humain saura souvent voir le point unique saisi deux fois distinctement. Ainsi des informations supplémentaires doivent retenir l'imprécision inhérente aux processus de saisie de la localisation afin d'apprendre à gérer cette imprécision.

Ces problèmes se présentent dès qu'une opération fait intervenir la géométrie : superpositions, calculs de surfaces, de longueurs, de densité, d'intersections, appariements etc... et pour l'annonce d'une fiabilité avec le résultat des opérations. En outre, un des problèmes rencontrés dans l'échange de données concerne la transmission de la topologie : on fait souvent des échanges en détruisant la topologie et en la reconstruisant après l'échange. Or la reconstruction correcte de la topologie n'est pas faisable sans gestion correcte de la précision (i.e. la géométrie ne suffit pas à reconstruire la topologie). On peut y voir une motivation supplémentaire à élucider les problèmes liés à la gestion de la précision.

L'existence de contrôles qualité à l'IGN permet de disposer de lots de mesures des écarts géométriques entre les bases de données et le terrain réel.

Objectifs

L'objectif de cette action de recherche consiste donc à modéliser l'imprécision de localisation dans les bases de données géographiques. Actuellement, pour contourner cet écueil, la solution, dite de la bande ϵ , propose d'ajouter une valeur de tolérance pour chaque objet. La localisation de l'objet peut alors varier d'une quantité ϵ mais pas au-delà. On représente cette zone de tolérance par un cercle pour un point, par un fuseau pour la ligne. Cependant, cette solution n'a de justification qu'algorithmique, elle ne repose pas sur des considérations propres aux données géographiques. Ainsi par exemple, un point ne peut se trouver en dehors de sa bande ϵ , ce qui occulte tous les problèmes issus de fautes. Quel que soit le mode de saisie, il y a des fautes et toute mesure ne peut pas s'insérer dans ce modèle.

Une bande ϵ paraît donc trop simpliste pour une modélisation du terrain sous forme vecteur, étant donné la diversité du processus de saisie et la diversité des objets représentés. Aussi, il nous semble opportun de reformuler maintenant la problématique de la précision de la mesure en tenant compte du processus de saisie et du type d'objet saisi.

Cette démarche implique de déterminer quelle est la position la plus probable pour un objet, ainsi que ses variations autour de cette position : c'est l'établissement du modèle de probabilité de présence. Une fois ce modèle validé, il convient de l'exploiter pour améliorer la gestion de la précision.

Activités

Vu la complexité de la chaîne de production, on choisit de ne considérer que le résultat. Le processus de production est donc vu comme fournissant de l'information de localisation entachée d'erreurs, suivant une variable aléatoire. On cherchera donc à fournir les paramètres de la loi qu'elle suit afin de pouvoir la manipuler. De plus, on décide de se préoccuper surtout des points car c'est la primitive géométrique la plus simple, qui est la mieux appréhendée par les modèles statistiques et parce qu'elle est à la base de la description des autres primitives.

Dans un tel contexte, le problème de la précision a d'abord été apprécié au moyen de l'opérateur de superposition, c'est-à-dire en s'interrogeant sur les critères d'identité entre deux points. Puis, s'inspirant d'une étude faite par H. Le Men en 1994, on a tenté d'étudier la fonction de répartition en chaque point. Selon H. Le Men, celle-ci peut s'exprimer dans certains cas sous la forme suivante :

$$f(x) = \frac{\alpha}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} + (1-\alpha)\frac{\lambda}{2} e^{-\lambda|x|}$$

Cependant, une telle expression reste à valider ou établir pour l'ensemble des classes d'un SIG. Puis, si elle s'avère satisfaisante, à déterminer les paramètres (α , σ , λ) pour chaque type d'objet ponctuel numérisé (puits, centre d'un carrefour...).

Plusieurs jeux de données issus des différentes bases de données de l'IGN (BDTopo, GéoRoute) font ou feront l'objet de tests. Sont ainsi exploitables les lots de contrôle qualité de la BDTopo et ceux de GéoRoute. Une réalisation en quatre exemplaires de la BDTopo sur une même région est une source précieuse qui devrait être examinée au début de l'année. Les autres contrôles disponibles ou prévus sont : les contrôles de routine à la BDTopo (mesure des écarts ponctuels entre la BD et le terrain), le projet de saisie d'une feuille à grande échelle avec les spécifications BDTopo (exemple : 1 : 5 000), la mise en place des contrôles qualité de la BDCarto. En outre, on peut souligner la mise en place du projet de contrôle qualité des bases de données.

Suites

L'orientation future des recherches est donc guidée en premier lieu par la validation du modèle. On étudiera l'utilisation de telles informations de précision, donc l'exploitation du modèle. La première étape à franchir est celle du regroupement de deux points, dans le cadre de la superposition par exemple : quelles coordonnées affecter au nouveau point regroupé, et surtout quelles valeurs affecter aux paramètres de précision (α , σ , λ) du point regroupé. On pourra aussi envisager son extension à d'autres types de données (les lignes et les surfaces). Une collaboration avec Lyad Abbas devrait permettre d'exploiter les résultats du contrôle linéaire pour les confronter à la modélisation proposée.

Par ailleurs ce travail s'inscrit dans le cadre du PSIG (sous-axe C1, impliquant également la CEGN (Cellule d'Étude en Géographie Numérique de la DGA) et le LRI (Laboratoire de Recherche en Informatique, Université Paris-11 Orsay). Les recherches s'inscrivent donc aussi dans ce cadre orienté vers le contrôle de la qualité. Des recherches complémentaires, liées également à l'axe C1 du PSIG (analyses de type statistique) ont de plus démarré en 1995.

Références

- [PERKAL 54] M. Perkal : *On epsilon length*, Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, vol. 4, pp. 399-403, 1956.
- [GOODCHILD 78] M. Goodchild : *Statistical aspects of the polygon overlay problem*, Harvard papers on GIS, vol. 6, 1982.
- [CHRISMAN 82] N. Chrisman : *A theory of cartographic error and its measurement in digital data bases*, Auto-Carto 5, pp. 159-168, 1982.
- [ZHANG 90] M. Zhang : *An algorithm for the avoidance of sliver polygons and cluster of points in spatial overlay*, 4th International Symposium on Spatial Data Handling, Zürich (CH), pp. 141-150, 1990.
- [PULLAR 91] M. Pullar : *Spatial overlay with inexact numerical data*, AUTO-CARTO 10, Technical paper 1991, ACSM ASPR, Annual Convention, vol. 6, 1991.
- [CNIG 93] : *Qualité des données géographiques échangées*, CNIG, document du groupe de travail, 1993.
- [HARVEY 94] M. Harvey : *Defining unmovable nodes/segments as part of vector overlay*, SDH'94, 1994.

Publications

- [HOTTIER 92] Ph. Hottier : *Bilan Recherche Activités 92*, Bulletin d'Information de l'IGN n° 61, 1992.
- [BENDER 93] L. Bender : *Spatial data quality, an overview*, rapport interne, IGN, laboratoire COGIT, 1993.
- [LE MEN 94] H. Le Men : *Géométrie de l'occupation du sol dans la BD Carto*, rapport interne IGN-DT, 1994.
- [VAUGLIN 94] F. Vauglin : *Modélisation de la précision géométrique dans les SIG*, ORC BDS du CNRS, Avignon (F), 1994.

C.3.5. Prototypé de SGBDOO localisé

par Laurent RAYNAL et Guylaine SCHORTER

Contexte

L'objectif de cette action de recherche consiste à étendre un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) Orienté-Objet (OO) pour la manipulation d'information géographique. Une extension du SGBDOO O₂ (de la société O₂Technology) a donc été développée et baptisée GéO₂.

Début 1993, GéO₂ comprenait déjà la définition des types géométriques (points, lignes, surfaces), l'implémentation de trois niveaux de complexité topologique (spaghetti, réseau et carte topologique, explicités dans les normes EdiGeO ou DIGEST-VPF) et la définition des types géographiques (tout objet ayant des caractéristiques alphanumériques et une représentation géométrique). De plus, un processus de chargement de données à partir de fichiers FEIV et un processus de visualisation permettent d'appréhender aisément les bases de données de l'IGN.

Deux suites sont envisagées pour cette action de recherche :

- d'une part, GéO₂ est utilisée au laboratoire COGIT pour explorer quelques fonctionnalités spécifiques d'un SGBD Géographique, en l'occurrence, la gestion de la précision, la gestion de données indépendamment de l'échelle de perception et la gestion de l'historique ,

- d'autre part, GéO₂ est un vecteur de collaboration vis-à-vis d'organismes extérieurs (CNAM-Paris, Université de Berlin (D), Université de Twente(NL)) et doit permettre ou susciter un transfert vers l'industrie, afin de voir éclore des SIG OO.

Activités

L'année 1994 reflète la double fonction de GéO₂ présentant des activités de développement en interne (intégration et évaluation du module de superposition, définition d'opérateurs spatiaux) et des activités de coopération avec des partenaires extérieurs (projets AMUSING, GEO₂DIS et GQL).

Module de superposition : L'objectif de cette activité est d'obtenir à partir de deux couches distinctes, une couche intégrée d'objets géographiques cohérente géométriquement et topologiquement [SCHORTER 94]. Les imprécisions inhérentes aux différents processus de production des données géographiques se manifestent dans la superposition par l'apparition d'éléments parasites (écarts positionnels entre les couches initiales). Pour éviter l'apparition de tels éléments, l'approche dite de «la bande ε» [CHRISMAN 82] a été implantée. A chaque segment est associé une «bande de tolérance»,

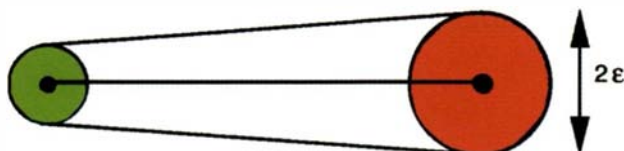


figure C.3.5.1

représentant l'espace dans les limites duquel peut se positionner le segment (ci-contre). L'idée consiste alors à déplacer la position des points extrémités des segments se situant dans la tolérance des autres afin de les regrouper en une seule position. Les tests réalisés avec la bande ε ont fourni des résultats dont il ressort le besoin d'un modèle de localisation plus élaboré. En effet, l'erreur géométrique engendrée par les différents processus de saisie n'a pas une répartition uniforme [VAUGLIN 94]. Aussi, cette étude s'insère maintenant dans le cadre de l'action de recherche sur la précision.

Opérateurs spatiaux : Le but de cette activité est de décrire un certain nombre d'opérations dont doit être pourvu un langage de requêtes spatiales pour couvrir le maximum de fonctions d'un SIG. Le modèle de données adopté est présenté dans [DAVID 93] et se fonde sur un Type Abstrait de Données appelé *Geometry*. Trois thèmes de recherche ont été abordés : le changement de référentiels géodésiques, l'expression de contrôles de cohérence de la BDCarto et le calcul d'intersection entre deux segments en introduisant la notion de résolution [FASQUEL 94], [FASQUEL 95].

Projet ESPRIT AMUSING n° 6881 : Depuis fin 1992, le laboratoire COGIT participe au projet AMUSING et y a réalisé trois tâches :

- la spécification de méthodes et procédures pour la caractérisation des données spatiales,
- la spécification d'un modèle pour la gestion du temps
- le développement d'un prototype de SIG Orienté-Objet (GéO₂).

Malheureusement, en mars 1994, soit à mi-parcours d'AMUSING, le projet a été interrompu. Aussi, depuis cette date aucune initiative n'a été prise en vue de poursuivre le travail escompté.

Conjointement, le travail sur la caractérisation des données spatiales a débuté sous la forme d'une sous-traitance à la société Fleximage. Un rapport a été remis à l'issue de ce travail mais n'a guère pu être exploité jusqu'à maintenant pour les raisons précédentes.

Projet ESPRIT GEO₂DIS n° 8017 : L'objectif du projet GEO₂DIS (GEographical Object Oriented heterogeneous Data Information Server) est de concevoir et de développer un serveur de données hétérogènes qui permette aux utilisateurs non expérimentés de manipuler (stocker, extraire, transformer, annoter) tous types de données référencés géographiquement. La société Matra Cap Systèmes, leader de ce projet, doit utiliser le produit O₂ comme un gérant d'objets géographiques augmenté de quelques fonctions spatiales. Le laboratoire COGIT apporte à ce titre sa compétence et son savoir-faire issus de l'expérience acquise avec le développement de GéO₂ (transfert de code, mesures de temps).

Projet ANVAR GQL : Ce projet a pour objectif de définir un langage de requête géographique (appelé GQL) capable de décrire, de stocker, de manipuler, d'analyser et de gérer des informations géographiques. Puis, il s'agit de réaliser une implantation de cette interface sur deux SGBD différents afin de montrer que le langage peut s'adapter à différentes techniques de stockage. Notre travail dans ce projet a consisté à conseiller la société Fleximage pour l'exploitation du prototype GéO₂ (un des deux SGBD sous-jacents).

Suites

Cette action de recherche se termine cette année, coïncidant avec la fin des participations du laboratoire COGIT dans des contrats extérieurs (AMUSING en mars 1994, GQL en octobre 1994 et GEO₂DIS en décembre 1994). Les faits les plus marquants ainsi que les enseignements issus de cette activité ont été relatés dans [RAYNAL 95].

Références

[CHRISMAN 82] N. Chrisman : *A theory of cartographic error and its measurement in digital data bases*, AUTO-CARTO 5, pp. 159-168, 1982.

Publications

- [DAVID 93] B. David & A. Voisard : *A Unified Approach to Geographic Data Modelling*, soumis à publication, 1993.
- [FASQUEL 94] P. Fasquel : *Expression de contrôle de cohérence géographique dans un langage indépendant des SIG*, Mémoire de DEA-SIG, Université de Marne-La-Vallée, Paris-7, 1994.
- [SCHORTER 94] G. Schorter, L. Raynal & F. Vauglin : *GéO₂ : Module de superposition*, Les Journées de la Recherche CASSINI, Lyon (F), pp. 251-261, octobre 1994.
- [VAUGLIN 94] F. Vauglin : *Modélisation de localisation*, Sixième Journée de la Recherche du CNIG, 1994.
- [FASQUEL 95] P. Fasquel & L. Raynal : *Indécision de l'intersection entre deux segments*, à paraître dans les actes de la 17ème conférence de l'ACI, 1995.
- [RAYNAL 95] L. Raynal, B. David & G. Schorter : *Building an OO GIS prototype : Experiments with GeO₂*, AUTO-CARTO 12, 1995.

C.3.6. Placement automatique des toponymes

par François LECORDIX

Contexte - objectifs

Destinée à exploiter au mieux les bases de données IGN pour la rédaction des cartes notamment des séries standard, cette action vise à l'automatisation du placement d'une part prépondérante des différents types d'écritures d'une carte, tout en conservant un placement de qualité cartographique. Les travaux entrepris les années précédentes ont abouti à un logiciel industrialisable pour le placement des écritures horizontales en fournissant des positions satisfaisantes pour 90% des écritures horizontales sur des cartes au 1 : 25 000 et au 1 : 1 000 000.

Activités - résultats

Rappelons d'abord brièvement les principes généraux de ces travaux. Pour modéliser les différentes règles cartographiques qui régissent le placement des écritures, une approche algorithmique a été choisie utilisant simultanément le mode maillé (pour la prise en compte du fond cartographique afin de minimiser l'écrasement de l'information cartographique par l'écriture) et le mode vecteur (pour tenir compte des autres règles cartographiques). Après détermination d'une liste de positions possibles pour chaque écriture prise isolément (c'est-à-dire sans tenir compte des autres écritures), la qualité de chaque position est quantifiée via une analyse multicritère. La liste des positions possibles pour une écriture est alors classée en fonction de leur qualité. Puis, pour gérer le non recouvrement des écritures entre elles, on détermine pour chaque position les positions des autres écritures qui la chevauchent. Enfin, soit par un algorithme séquentiel, soit en utilisant un algorithme de recuit simulé, on sélectionne une position pour chaque écriture.

Après les travaux de 1992 et 1993 sur le placement automatique des écritures horizontales à position (noms de villes, lieux-dits, points cotés...) sur des échelles du 1 : 1 000 000 et 1 : 25 000 [LECORDIX et al 94], cette action de recherche s'est poursuivie par une phase d'industrialisation et par une poursuite de la recherche sur les numéros de routes et le positionnement des kilométrages.

- La phase d'industrialisation pour les noms horizontaux, entreprise avec la Société BARCO GRAPHICS, a débouché en septembre sur une première version du logiciel dans l'environnement Mercator™ (logiciel de rédaction cartographique). La vérification d'aptitude s'est effectuée en octobre et l'utilisation en production commencera sur la nouvelle carte au 1 : 1 000 000 puis sur les cartes au 1 : 25 000 issue de la BDTopo. D'autres versions du logiciel devraient suivre en 1995 qui permettront un travail mixte (interactif et batch).

- Les recherches au laboratoire COGIT ont continué avec la thèse de Mathieu Barrault, dans la continuité de son sujet de stage de DEA. Exploitant la même démarche que pour les noms horizontaux, la première version du logiciel de placement des numéros de routes a été mise au propre et enrichie notamment en ce qui concerne les problèmes de répétition le long de l'axe de la route. De plus, afin d'améliorer encore la qualité cartographique, les recherches se sont orientées vers une prise en compte de la densité toponymique globale (éviter des zones trop denses et d'autres trop désertiques en écritures) en utilisant la triangulation de Delaunay.

- En parallèle, un stage de DESS a été effectué sur le placement automatique des kilométrages pour une carte routière au 1 : 1 000 000, à partir d'un graphe contenant déjà les pastilles kilométriques [MARROT 94]. La première étape du traitement consiste à déterminer les chemins à renseigner, c'est-à-dire tous les chemins compris entre deux pastilles kilométriques. Cette phase se réalise en utilisant un algorithme dont le principe est celui de la détermination du chemin le plus court dans un graphe. La suite du traitement utilise alors une démarche calquée sur les recherches précédentes (détermination de positions possibles pour l'écriture, quantification de leur qualité, détermination de leur incompatibilité, choix de la meilleure position). De plus pour optimiser les calculs, le problème a été décomposé en composantes connexes qu'on résout séparément. Les résultats du travail sont satisfaisants pour les pastilles secondaires (le pourcentage de bon positionnement jugé par un cartographe est de 85%) mais demandent à être améliorés pour les pastilles principales issues du cumul de chemins secondaires [LECORDIX 94].

Publications

[LECORDIX et al 94] F. Lecordix, C. Plazanet, F. Chirié, J.P. Lagrange, T. Banel & Y. Cras : *Placement automatique des écritures d'une carte avec une qualité cartographique*, EGIS/ MARI 94, volume 1, pp. 22-32, mars-avril 1994.

[LECORDIX 94] F. Lecordix : *Placement automatique des kilométrages*, note IGN/DT 94-1361, novembre 1994.

[MARROT 94] J.M. Marrot : *Placement automatique des kilométrages sur une carte routière au 1 : 1 000 000*, rapport de stage de DESS SCHM, 1994.

[BARRAULT 95] M. Barrault & F. Lecordix : *An automated System for linear feature name Placement wich complies with cartographic quality criteria*, AUTOCARTO 12, février-mars 1995 (à paraître).

C.3.7. Problèmes de modélisation en généralisation

par Jean-Philippe LAGRANGE

Contexte - objectifs

Les études menées jusqu'à présent en matière de généralisation (voir comptes-rendus et bilans des années précédentes) ont mis en évidence l'importance des problèmes de modélisation. Par modélisation, on entend ici l'analyse de l'information nécessaire pour la généralisation, l'étude des techniques qui permettent de la mettre en évidence et le problème de la représentation de cette information. Ceci nous a conduit à créer cette action de recherche pour 1994, avec pour objectif de regrouper les efforts portant sur les thèmes évoqués ci-dessus et auparavant répartis entre les actions de recherche "méthodes algorithmiques" et "approche IA" en cherchant ainsi à mettre en évidence les points communs entre les différents besoins apparus jusque là.

De plus, cette action de recherche fournit un cadre adapté pour la thèse en cours sur la modélisation et la généralisation du relief. Pour ce dernier point l'objectif est d'aboutir en fin d'études à des techniques permettant de produire des reliefs généralisés sous forme de MNT ou de courbes de niveaux (pour la cartographie à petite/moyenne échelle dans un premier temps).

Les retombées attendues sont, d'une part, un cadre méthodologique pour les autres recherches en généralisation et, d'autre part et dans un deuxième temps, des propositions quant à des informations complémentaires dans les bases de données géographiques et quant à la modélisation des données géographiques.

Activités - résultats

Les travaux ont porté sur trois directions complémentaires, correspondant respectivement aux études liées à l'algorithmie, à la prise en compte de l'aspect contextuel de la généralisation et au relief.

Ce qu'on peut noter d'emblée c'est que ces recherches ont conduit à systématiser une approche peu répandue jusque là dans le domaine de la généralisation, à savoir le passage par des représentations intermédiaires ou auxiliaires pour effectuer les transformations ou les analyses. Ce principe peut être assez bien traduit par la figure C.3.7.1.

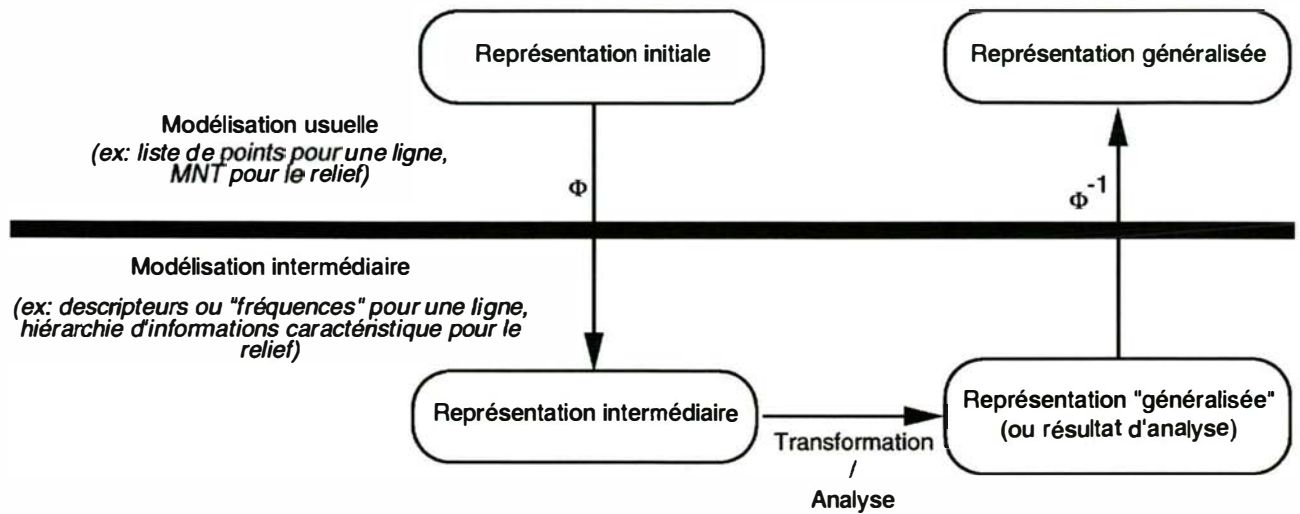


figure C.3.7.1.

De fait ce schéma de principe s'applique de façon moins directe aux recherches de modélisation. Par ailleurs cette action de recherche évolue depuis le printemps vers un travail qui comporte une part de plus en plus grande d'implémentation, après une première phase qui avait été largement consacrée aux études de modélisation (résumées dans [LAGRANGE, RUAS 94]). Il a donc été décidé de ne rattacher à cette action que les études de modélisation relatives au relief et à la généralisation du linéaire à partir de l'année 1995.

En ce qui concerne le linéaire deux directions ont été plus spécifiquement approfondies et seront poursuivies en 1995.

D'une part, un premier travail qui porte sur la caractérisation et la classification des formes du linéaire. D'un point de vue applicatif, l'objectif est *in fine* d'être capable d'appliquer la bonne transformation (ou la bonne séquence de transformations) à un élément linéaire ou à une partie d'un tel élément. Ceci permettrait de généraliser (dans un premier temps de simplifier) le linéaire de façon entièrement automatique tout en maintenant les formes. L'approche suivie consiste d'abord à élaborer des mesures (en partant des travaux antérieurs : points d'inflexions, sommets et des nombreux travaux disponibles dans la littérature) qui permettent, d'une part, de décomposer un élément linéaire en section géométriquement homogènes et, d'autre part, de classer les formes ainsi isolées. Dans un deuxième temps, on cherchera à associer ces formes "primitives" à des séquences de transformations spécifiques. En 1995, la première partie de ce travail a été entreprise et nous commençons à obtenir des résultats prometteurs, aussi bien en ce qui concerne la décomposition des éléments linéaires qu'en ce qui concerne la classification des résultats (voir [PLAZANET et al 94] et [PLAZANET 94]). Dans le cadre de ce travail, la représentation intermédiaire est donc constituée par des ensembles de formes auxquelles on associe une géométrie (dont la représentation n'est pas nécessairement une liste de points).

D'autre part, un autre travail a débuté en milieu d'année, qui devrait se prolonger par une thèse, qui vise à construire directement une représentation de la géométrie sur laquelle on applique des transformations spécifiques. Pour cela une étude de différentes représentations envisageables a d'abord été menée, puis les recherches se sont particulièrement concentrées sur les séries de Fourier calculées sur la suite des courbures ainsi que sur les ondelettes. De telles transformations sont inversibles (qualité nécessaire dans cette approche) et de plus de premiers essais de transformation consistant à appliquer un filtre passe-bas puis une transformation affine semblent indiquer que la voie est prometteuse [FRITSCH 94].

En ce qui concerne le relief, les études se sont concentrées sur les classes et niveaux d'information à considérer [MONIER 94a] [MONIER 94b] et, d'un point de vue expérimental, sur des méthodes permettant de décomposer une zone donnée en grands ensembles morphologiques (pour l'instant en s'appuyant sur les lignes de crêtes et les thalwegs).

Publications

- [FRITSCH 94] E. Fristch : *Recherche de représentations et d'outils pour la généralisation*, (IGN, laboratoire COGIT-Université de Zürich), rapport de DEA-SIG, 1994.
- [LAGRANGE, RUAS 94] JP. Lagrange & A. Ruas : *Data and Knowledge Modelling for Generalization*, in Proc. of Spatial Data Handling, Edinburgh (GB), pp. 1099-1117, 1994.
- [MONIER 94a] P. Monier : *Généralisation et orographie*, Euroconferences (communication brève), 1994.
- [MONIER 94b] P. Monier : *Généralisation et orographie*, rapport intermédiaire, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 1994.
- [PLAZANET et al 94] C. Plazanet, JG. Affholder, JPh. Lagrange & A. Ruas : *Représentation et analyse de formes pour la généralisation cartographique*, EGIS'94
- [PLAZANET 94] C. Plazanet : *Shape characterization for the generalization of linear geographical objects*, Euroconferences, 1994.

C.3.8. Généralisation automatique : approche IA

par Anne RUAS

Contexte - objectifs

La généralisation apparaît comme un processus de plus en plus important pour l'exploitation des bases de données. Le cas de l'IGN est à ce titre classique : comment réaliser des cartes aux 1 : 25 000 et 1 : 50 000 à partir de la BDTopo, au 1 : 100 000 et 1 : 250 000 à partir de la BDCarto ? L'objectif de cette action de recherche est d'identifier les principes et les outils permettant d'automatiser au maximum le processus de généralisation. Elles ne portent donc pas sur l'étude des algorithmes de généralisation (cf. C.3.9.), mais sur l'identification des conflits, le choix d'une méthode de résolution (meilleurs objets à traiter, meilleur séquençement d'opérations) et le maintien de la cohérence de la base de données après la réalisation d'une opération quelconque de généralisation.

Les techniques issues de l'intelligence artificielle semblent bien adaptées aux tâches évoquées ci-dessus. Un nombre significatif de prototypes ont déjà été réalisés [HERBERT 91], ayant pour principal défaut une formalisation incomplète des connaissances : nous pensons que la connaissance utilisée par le système-expert doit essentiellement être contenue dans la base de données objet et que les règles doivent permettre un meilleur séquençement des opérations en fonction de la qualification des situations à traiter. Notre travail consiste donc, dans un premier temps, à analyser l'information manquante dans les bases de données et à mettre au point des outils permettant de la retrouver et de la représenter (voir [MACKANESS 94] pour une démarche analogue).

Nous utilisons des logiciels de la société ILOG écrits en LeLisp, dont le générateur de systèmes-experts SMECI permettant de manipuler des connaissances procédurales, à base de règles et orienté-objet.

En 1992-1993 nous avons réalisé un état de l'art en généralisation puis codé les couches basses nécessaires à nos recherches. Nous disposons donc fin 1993 d'un SIG permettant de manipuler et de visualiser des données géographiques décomposées en deux couches d'informations : sémantique (ou géographique) et topométrique.

Activités - résultats

Cette année fut consacrée au développement d'un module de chargement de données IGN, au développement d'algorithmes géométriques dédiés à la généralisation et à l'extension du modèle de données.

Chargement

Des lots de données de la BDTopo ont été chargées via GéO₂, ce qui nous a permis d'utiliser les bibliothèques existantes et de créer un graphe complet, nécessaire sous SMECI. Le logiciel d'export de GéO₂ a été réalisé par G. Schorter. Nous travaillons sur des villages de tailles et de structures différentes (de deux à quatre Mo).

Développement d'algorithmes géométriques

- distance de Hausdorff, utilisée pour contrôler l'écart entre un objet et sa position initiale,
- enveloppe convexe : pour le calcul de la triangulation de Delaunay et comme critère de ressemblance et de complexité entre deux structures,
- des algorithmes de transformation géométrique : (filtrage de Douglas et Peucker, lissage par filtrage Gaussien), afin d'étudier les effets de ces algorithmes sur le voisinage de l'objet transformé,
- triangulation locale de Delaunay pour représenter les relations de proximité entre objets non connexes,
- calcul de propagation de déformation à l'aide de règles et de la triangulation locale de Delaunay.

Évolution de la modélisation des données : Aux deux couches classiques (géographique et topométrique) nous avons ajouté quatre couches d'information ayant pour but de porter des informations supplémentaires ou de mieux contrôler certaines opérations. La difficulté de l'existence de différentes couches d'information ne réside pas tant dans leur représentation que dans leur maintien et leur cohérence tout au long des différentes opérations de généralisation.

- *Les objets Référence* sont une duplication des objets initiaux (noeuds, arcs) permettant de contrôler les déformations successives, en fonction de la nature des objets. Le lien entre un objet du monde actif et sa référence est porté par un vecteur dont la valeur correspond à la distance de Hausdorff.

- *Les objets Partition* permettent de partitionner l'espace à partir d'objets géographiques qui le structurent. Ce partitionnement hiérarchique permet de définir des espaces de travail et de commencer à séquencer les opérations (principe que l'on retrouve dans [LEE 93], [PENG 92]). Les objets structurants choisis sont les routes parce qu'elles sont :

- liées à l'activité humaine (sa densité d'information suit la densité globale d'information),
- aptes à créer des cycles, donc des partitions,
- généralement conservées pendant la généralisation,
- déjà hiérarchisées.

- *Les objets Triangulation* permettent de modéliser les relations de proximité entre objets non connexes. Ces relations sont indispensables pour détecter les conflits de proximité et pour propager une déformation locale en maintenant autant que faire se peut les relations spatiales entre objets déplacés. Ces triangulations ne sont calculées que lors d'une déformation géométrique et s'appuient non pas sur le contour des objets mais sur des points d'ancrage dont le choix dépend des objets à traiter et des modifications à réaliser (exemple : lors de répercussion du lissage d'une route sur des maisons proches, la triangulation est calculée entre le centre des maisons et leur projection sur la route (contrairement à [JONES 92]). Les vecteurs de déplacement peuvent ainsi être répercutés de la route aux maisons).

- *Les objets Structure* : une structure est une répartition caractéristique d'objets (exemple : alignement de maisons). Les structures sont des informations non identifiées dans les bases de données mais constituent une information primordiale que le cartographe sait identifier et conserver. Actuellement certaines structures sont saisies interactivement pour pouvoir être utilisées comme contraintes lors des opérations de généralisation. Jean-François Hangouët a commencé une thèse sur ce sujet en septembre 1994.

Perspectives

Les recherches en cours sont centrées sur l'amélioration des modèles de forces pour la répercussion des déplacements, la formalisation des différents types de conflits, la définition et les caractéristiques de structures et les méthodes de généralisation d'un ensemble d'éléments surfaciques (thèse commencée en octobre 1994 par Nicolas Régnault).

Références

- [BEARD 91] K. Beard : *Constraints on rule formation dans Map Generalization*, Ed. Longman Scientific & Technical, 1991.
- [HERBERT 91] G. Herbert & EM. Joao : *Automating map design and generalisation : A review of systems and prospects for future progress in the 1990's*, SERRL, 1991.
- [JONES 92] C. Jones, G. Bundy & J Ware : *Multiscale spatial modelling with triangulated surfaces*, Spatial Data Handling, vol. 2, pp. 612-621, 1992.
- [PENG 92] WN. Peng : *Automated generalisation of urban road-networks for medium scale topographic data base*, thèse ITC, 1992.
- [LEE 93] F. Lee & G. Robinson : *Development of an automated generalisation system for large scale topographic maps*. GIS-RUK
- [MACKANESS 94] W. Mackaness : *Issues in resolving visual spatial conflicts in automated map design*, Spatial Data Handling, vol. 1, pp. 325-340, 1994.

Publications

- [HANGOUËT 94] JF. Hangouët : *Calcul de distance de Hausdorff sur des données vecteur sur le plan*, rapport technique IGN DT-941034, 1994.
- [LAGRANGE 94] JPh. Lagrange & A. Ruas : *Geographic data modelling: GIS and generalisation*, Spatial Data Handling, vol. 2, pp. 1099-1117, 1994.
- [RUAS 94] A. Ruas & JF. Hangouët : *Notice des développements sous ILOG*, IGN DT-940801, 1994.
- [RUAS 94] A. Ruas & JPh. Lagrange : *Modélisation pour l'automatisation de la généralisation*, EGIS, pp. 37-47, 1994.

C.3.9. Méthodes algorithmiques pour la généralisation automatique

par Jean-Georges AFFHOLDER et François LECORDIX

Contexte - objectifs

Le but de cette action de recherche est de contribuer à l'automatisation de la généralisation par des méthodes algorithmiques. Les applications finales à l'IGN concernent les cartes dérivées à petite et moyenne échelles (1 : 250 000 et 1 : 100 000), notamment pour ce qui est des travaux qui portent sur la généralisation du linéaire, et les cartes à moyenne échelle (1 : 25 000 et 1 : 50 000), notamment pour ce qui est de la généralisation du bâti.

Plus précisément, on se focalise ici sur des techniques qui relèvent de ce que l'on appelle la généralisation intrinsèque ou indépendante, c'est-à-dire qu'un outil de généralisation est appliqué à un objet indépendamment du contexte spatial et sémantique de cet objet (non prise en compte des conflits avec d'autres objets...). Les outils résultant doivent donc en première approche pouvoir être utilisés dans le cadre d'un processus de généralisation interactive, sous la supervision d'un opérateur. Dans ce but sont menées des études qui visent en priorité à la généralisation du linéaire, en particulier du linéaire routier, et à la généralisation du bâti (hors prise en compte des structures géographiques) ainsi que des études portant sur le développement d'une plate-forme interactive qui sert de boîte d'accueil aux autres développements et doit permettre de valider les outils, d'une part, et d'étudier le processus interactif, d'autre part.

Activités - résultats

Les travaux antérieurs portant sur la représentation par arcs de cubiques [AFFHOLDER 94] et sur son utilisation ont été poursuivis. L'accent a été mis plus particulièrement sur :

- l'analyse des paramètres à employer pour les filtrages gaussiens utilisés, en particulier en ce qui concerne la corrélation entre les valeurs choisies et la ligne considérée. En effet on utilise un filtrage gaussien sur la ligne elle-même et un filtrage sur la suite des produits vectoriels. Or ces filtrages ont une influence importante sur la détermination des points d'inflexion et ne peuvent avoir la même amplitude quel que soit le type de ligne,

- le mode de détermination des points d'inflexion, qui a été amélioré et surtout optimisé (temps CPU),

- le problème de la caricature, plus précisément le sous-problème de l'amplification d'un virage. On a pour cela réutilisé et adapté une idée proposée initialement par [LOWE 88] pour corriger certains effets du filtrage gaussien. Ce point est rapidement exposé dans [PLAZANET et al 94]. Au passage des algorithmes complémentaires de traitement des arcs de cubiques ont été développés (rectification, transformation inverse...).

Ces études, surtout la première et la troisième doivent être encore prolongées en 1995 pour aboutir à des résultats vraiment satisfaisants.

Par ailleurs, en liaison avec les études de représentation et de modélisation, un travail complémentaire et original a débuté dans le cadre d'un stage de DEA. L'état actuel est une technique de simplification (et aussi d'amplification de virages dans certains cas) qui consiste à calculer la série de FOURIER de la suite des courbures de la ligne, puis à appliquer un filtre passe-bas et une transformation affine [FRITSCH 94]. Les résultats sont intéressants dès lors que l'on ne veut pas généraliser d'une façon radicale qui impliquerait des suppressions de virages ou des caricatures. Par ailleurs cette technique devrait également pouvoir s'appliquer de façon très satisfaisante sur du linéaire hydrographique.

Pour conclure sur les développements d'algorithmes ajoutons que les mesures utilisées dans le cadre de l'étude de la caractérisation de la géométrie du linéaire ont été implémentées sur la plate-forme et qu'un système de simplification des contours du bâti a été développé en vue des cartes au 1 : 25 000 et 1 : 50 000 [DAMOUR 94].

La plate-forme elle-même a connu peu d'évolution en 1994 en ce qui concerne ses fonctions internes mais une série de travaux antérieurs ont été intégrés dans cet environnement et validés sur des lots de taille réels (plusieurs feuilles BDCarto, environ la moitié d'un département...). 1995 devrait donner lieu à davantage de développement de la structure interne de la plate-forme et de l'interface.

Enfin nous avons pu évaluer le logiciel de généralisation interactive Map Generalizer (MGE/MG) de la société Intergraph sur différentes données IGN. Cette expertise [ROUSSEAU et al 94] avait pour but, d'une part et dans une optique de recherche applicative, de déterminer dans quelle mesure et comment cet outil peut répondre aux besoins de généralisations qui nous sont connus et, d'autre part, de profiter de l'analyse de cet outil pour affiner les priorités de recherche (tant en ce qui concerne les méthodes et outils qu'en ce qui concerne les problèmes d'ergonomie et de processus). Fournissant des outils intéressants pour la généralisation interactive du bâti aux grandes échelles, ce logiciel souffre de limitations rédhibitoires (notamment dans l'affichage des éléments cartographiques avec leur légende) ne permettant pas de visualiser et donc de traiter interactivement les conflits de superposition dus à la symbolisation, qui sont une part importante des problèmes de généralisation aux petites échelles .

Les recherches en 1995 devraient porter sur :

- l'utilisation des ondelettes pour résoudre quelques difficultés posées par la transformation de Fourier (notamment la non-localisation des détails),
- le développement des méthodes d'exagération et de caricature (à partir des cubiques, dans le prolongement de ce qui a été fait en 1994, mais aussi par approche fréquentielle),
- l'implantation dans la plate-forme d'une batterie d'outils de mesures géométriques, suivie d'une évaluation détaillée des outils de simplification (avec pour but d'automatiser le choix de l'outil et du paramétrage),
- la refonte de l'interface de la plate-forme et, si possible, l'enrichissement de ses structures internes.

Publications

[AFFHOLDER 94] J.G. Affholder : *Une modélisation du linéaire routier en vue de la généralisation*, note DT 94 0184, février 1994.

[DAMOUR 94] S. Damour : *Généralisation du bâti : la simplification des contours*, IGN, ENSG, rapport de stage de DEA-SIG, juin 1994.

[FRITSCH 94] E. Fritsch : *Recherche de représentation et d'outils pour la généralisation*, IGN, ENSG, rapport de stage de DEA-SIG, juin 1994.

[LOWE 88] D.G. Lowe : *Organization of Smooth Image Curves at Multiple Scales*, 2e ICCV, pp. 558-567, 1988.

[PLAZANET et al, 94] C. Plazanet, J.G. Affholder, JPh. Lagrange & A. Ruas : *Représentation et analyse de formes linéaires pour l'automatisation de la généralisation cartographique*, EGIS/MARI'94, volume 2, pp.1112-1121, mars - avril 1994.

[ROUSSEAU et al 94] D. Rousseau, T. Rousseau & F. Lecordix : *Expertise de Map Generalizer, logiciel de généralisation interactive d'Intergraph*, note SR-IGN 940051/S- RAP, décembre 1994.

C.4.1. Maintenance du système de référence terrestre de l'IERS

par Zuheir ALTAMIMI et Claude BOUCHER

Contexte et objectifs

Le 17 décembre 1986 a été signée une convention relative à la participation de l'Observatoire de Paris, de l'IGN et du Bureau des Longitudes au fonctionnement du Bureau Central de l'IERS (International Earth Rotation Service).

Le rôle de l'IGN est d'assurer les travaux et les recherches nécessaires à la formation et à l'entretien du Système de Référence Terrestre de l'IERS (appelé ITRS). C'est en effet le rôle que l'IGN continue de jouer depuis la création de l'IERS en 1988.

La compétence de l'IGN dans ce domaine est reconnue; elle se concrétise par des travaux et publications diffusés au niveau international et qui servent couramment de références. Cette compétence est valorisée par la participation active de l'IGN aux différents programmes internationaux de mesure dans le domaine de la géodésie spatiale et de la rotation de la Terre, qui nécessitent l'établissement d'un système de référence terrestre global et précis.

L'objectif est essentiellement métrologique, car on cherche avant tout la meilleure détermination possible (un millimètre) à la fois des coordonnées des stations et de leurs vitesses de déplacement. La réalisation de cet objectif passe notamment par la recherche d'une meilleure combinaison possible des différentes données des techniques spatiales.

Travaux effectués en 1994

Les principales activités menées en 1994 ont été les calculs et analyses relatifs à la réalisation de l'ITRS pour 1993, appelée ITRF93.

L'ITRF93 consiste en deux jeux de coordonnées; à l'époque 88.0 et 93.0, et un champ de vitesses combiné cohérent avec ces deux jeux. Ont été utilisées dans cette réalisation, quatre solutions VLBI, cinq solutions GPS et quatre solutions SLR. De plus, l'orientation et l'évolution temporelle de l'ITRF93 ont été contraintes afin d'être en accord avec les séries de paramètres d'orientation de la Terre déterminées par l'équipe de l'Observatoire de Paris. Afin d'assurer la cohérence entre les coordonnées aux deux époques d'une part, et le champ de vitesses d'autre part, des analyses détaillées ont été entreprises. Ces analyses concernent à la fois les paramètres et résidus globaux (par solution) ainsi que la qualité des coordonnées et vitesses des stations. L'analyse complète et les résultats de l'ITRF93 ont été publiés dans la note technique de l'IERS n° 18 [BOUCHER et al 94].

D'autre part, des analyses et solutions spécifiques ont été réalisées (séries des solutions ITRF-P) pour les besoins des centres d'analyse IGS dans leur calculs d'orbite [ALTAMIMI et al 94a].

Conclusion

On note une amélioration de la qualité des solutions individuelles à la fois en positions et vitesses des stations, ce qui rend l'ITRF93 de meilleure qualité que les réalisations précédentes [ALTAMIMI et al 94b]. Le tableau suivant résume les résidus globaux par technique, pour les meilleures solutions. On remarque toutefois que le seul champ de vitesses estimé par GPS n'est pas de bonne qualité due au peu d'observations GPS disponibles actuellement.

Technique	Positions à 88.0 (mm)	Positions à 93.0 (mm)	Vitesse (mm/an)
VLBI	5	5	1
GPS	28	10	6.6
SLR	15	20	2

tableau C.4.2.1.

Activités prévues pour 1995

- Développement d'un nouveau logiciel de combinaison globale; positions et vitesses (GEOMIX),
- utilisation des matrices complètes de variance-covariance pour le calcul et les analyses nécessaires à l'établissement de l'ITRF94,
- inclusion de solutions DORIS dans l'ITRF94,
- études particulières qui concernent l'aspect évolution temporelle de l'ITRS, le lien avec les séries de paramètres de rotation de la Terre de l'IERS et l'amélioration des coordonnées des stations de l'ITRF [BOUCHER 94a].

Publications

- [ALTAMIMI et al 94a] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Duhem : *Activity report of the ITRF Section of the IERS Central Bureau : ITRF92 and ITRF-P solutions*, 1994 IERS Workshop, Observatoire de Paris, mars 1994.
- [ALTAMIMI et al 94b] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Duhem : *The IERS Terrestrial Reference Frame 1993 (ITRF93) : Consistency with the IERS Earth Orientation Parameters*, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), décembre 1994.
- [BOUCHER 94a] C. Boucher : *Overview of possible improvements of ITRF coordinates*, 1994 IERS Workshop, Observatoire de Paris, mars 1994.
- [BOUCHER 94b] C. Boucher : *A proposal from the IERS Terrestrial Reference Frame Section to include regional networks in their analysis strategies*, 1994 IGS Workshop, Paris (F), mars 1994.
- [BOUCHER 94c] C. Boucher : *The Realization of the International Terrestrial Reference System (ITRS) : A Challenge for a joint IERS/IGS solution*, IGS Workshop, Pasadena (USA), décembre 1994.
- [BOUCHER et al 94] C. Boucher, Z. Altamimi & L. Duhem : *Results and Analysis of the ITRF93*, IERS Technical Note n° 18, Observatoire de Paris, 1994.

C.4.2. Détermination du géoïde

par Henri DUQUENNE et JIANG Zhiheng

Introduction

Les méthodes de détermination du géoïde ont récemment fait des progrès remarquables, sur le plan théorique comme sur celui de la qualité des données disponibles. L'association de diverses techniques permet d'envisager la réalisation de géoïdes précis (quelques centimètres) et de haute résolution (quelques kilomètres). Dans le domaine scientifique, de telles réalisations sont des outils pour la comparaison et l'unification des références verticales, qui constituent un thème de recherche important pour le LAREG. Plus prosaïquement, la réalisation de géoïde précis trouve des applications dans le nivellement par GPS.

Le contexte européen et national

La coopération internationale : Sous l'égide de l'Association Internationale de Géodésie (AIG), un géoïde européen est actuellement en cours de calcul à l'Université de Hanovre (D). L'opération a pris un peu de retard sur les prévisions initiales, en raison de l'intégration des données d'Europe de l'Est devenues disponibles. Une solution devrait être présentée à l'Assemblée Générale de l'UGGI en juillet 1995. L'IGN a participé à cette opération en fournissant un modèle numérique de terrain de la France et de la Corse, et cédera, lorsqu'elles seront disponibles, les coordonnées et altitudes des mille points GPS du futur Réseau de Base Français (RBF), permettant ainsi une opération de validation du géoïde et de l'altimétrie du RBF.

Les recherches et développements au CNES/BGI : Le Bureau Gravimétrique International (BGI) est un partenaire privilégié du LAREG en matière de détermination du géoïde. Cet organisme développe en effet depuis 1992 un ensemble de logiciels qui implémentent les meilleures méthodes connues de traitement des données gravimétriques et d'altimétrie par satellite. Pour les calculs de géoïdes gravimétriques, ce logiciel utilise la méthode de STOKES améliorée (voir ci-dessous) qui devrait s'avérer plus performant sur le plan de la précision que celui dont dispose l'IGN. Le logiciel du BGI permet également d'incorporer les données altimétriques au calcul du géoïde national, ce qui doit pourvoir au manque de données gravimétriques en mer et améliorer la précision le long des côtes. Le BGI a par ailleurs procédé à une validation complète des données gravimétriques française. En 1994, il a réalisé une comparaison des altitudes des points gravimétriques figurant dans sa base de données au modèle numérique de terrain de l'IGN. Des erreurs de plusieurs dizaines de mètres affectant quelques levés ont ainsi pu être mis en évidence. La coopération entre les deux organismes se poursuivra par des essais concertés des logiciels sur des zones où l'existence de points GPS nivelés permet des validations, ou dans des régions où le calcul est plus délicat (montagne, bord de mer).

Les recherches au LAREG en 1994

Les recherches ont porté sur les méthodes terrestres de détermination du géoïde. Les trois méthodes étudiées ont pu être évaluées et comparées sur un réseau d'essai dont les caractéristiques méritent d'être décrites.

Le réseau test

Ce réseau comporte soixante trois points GPS nivelés répartis sur la feuille de Manosque, soit 560 km². Les observations et calculs ont été réalisés en 1993 et 1994 par les étudiants de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) et, pour une petite partie, de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT). La précision des coordonnées GPS est estimée à deux-trois centimètres, celle des altitudes à un centimètre. Ce réseau, très dense, permet d'évaluer les méthodes de réalisation du géoïde par différentes méthodes, aussi bien que les techniques de nivellement par GPS.

Les méthodes de détermination

Géodésie intégrée et collocation : Les travaux sur ce thème, entamés en 1992 (voir [JIANG 93], [SECHAUD 93], [DUQUENNE et al 94a]), se sont poursuivis jusqu'en juillet 1994 par un ajustement des observations relatives au réseau de Manosque [LEMARIE 94]. Ces tests ont bien révélé les limites de la méthode. Les temps d'ordinateur nécessaires pour traiter un réseau même petit se sont avérés prohibitifs. Le logiciel utilisé (OPERA) présente quelques défauts auxquels on ne peut remédier sans acquérir les sources du programme. La méthode ne serait réellement intéressante que pour traiter des réseaux très intégrés, c'est-à-dire pour lesquels on dispose, pour chaque point, de plusieurs types d'observations (astronomie, géodésie terrestre et spatiale, gravimétrie) de qualité comparable. Néanmoins, on a obtenu une précision intéressante (4,8 centimètres) en nivellement par GPS.

GPS et nivellement : Sur le réseau de Manosque, un essai d'interpolation de la surface de référence d'altitude a été réalisé, utilisant seulement les coordonnées issues du GPS et les altitudes d'un certain nombre de points d'appui. Les autres points du réseau, considérés comme points de contrôle, ont permis de déterminer la précision. Des écarts-types de 6,9 centimètres (avec cinq points d'appui) à 4,8 centimètres (avec trente et un points d'appui) ont été constatés. Cet essai montre les possibilités et les limites du nivellement par GPS basé sur une simple interpolation, dans une région au relief moyennement accidentée. Cette expérience est décrite en détail dans [LEMARIE 94] et [DUQUENNE et al 94b].

Méthode de Stokes : La méthode de Stokes consiste à calculer la hauteur du géoïde en intégrant, en principe sur la Terre entière, des anomalies de pesanteur. En fait, la contribution des zones lointaines est donnée par un modèle de champ. L'influence des masses proches de la croûte terrestre est déduite d'un modèle numérique de terrain. Les calculs sont aussi volumineux qu'en collocation, mais ils peuvent être divisés. En contrepartie, la méthode ne fournit pas par elle-même d'estimation de la précision. Le LAREG a acquis l'ensemble de programmes "GRAVSOF", qui permet d'exécuter ce genre de calcul. Toutes les variantes ont été testées, en particulier les modules d'intégration par transformées de Fourier rapides. Plusieurs améliorations ont été apportées. Une méthode d'intégration rapide originale a été développée, qui permet de réduire d'un facteur 50 à 70 le temps de calcul sans perte sensible de précision (voir [JIANG 94b]). Un programme de combinaisons de géoïde gravimétrique et de points GPS nivelés est en cours de développement [JIANG 94 a].

A titre expérimental, on a réalisé un géoïde sur le réseau test de Manosque, et on l'a comparé aux résultats issus du GPS et du nivellement [LEMARIE 94], [DUQUENNE et al 94b]. Après réduction des biais par une régression, la précision s'établit à 2,8 centimètres.

Les perspectives à moyen terme

Les résultats encourageants obtenus par la méthode de Stokes permettent d'envisager, en coopération avec le BGI, la réalisation d'un géoïde gravimétrique national d'une précision de quelques centimètres. Il pourra être comparé aux mille points GPS nivelés du Réseau de Base Français, et une version particulière de géoïde adapté au besoin du nivellement par GPS pourra être calculée. Néanmoins, certains problèmes doivent encore être résolus :

- l'unification des systèmes de référence géodésiques et altimétriques utilisés,
- la détection des fautes, lorsque la distance entre les points d'appui augmente jusqu'à vingt cinq kilomètres,
- la comparaison du géoïde gravimétrique aux points d'appui sur une très grande surface,
- l'efficacité des corrections de terrain et la précision du GPS dans les zones montagneuses,
- la perte de précision dans les régions côtières due au manque de données gravimétriques en mer,
- l'acquisition de données (MNT, gravimétrie) dans les pays étrangers, pour traiter correctement les zones frontalières.

Une partie au moins de ces thèmes de recherches seront abordés en 1995.

Publications

[DUQUENNE et al 94 a] H. Duquenne, Z. Jiang & C. Lemarié : *Geoid determination and levelling by GPS : some experiments on a test network*, présenté au Symposium "Gravity and Geoid", Graz (A), 11-17 septembre 1994, CC/G 612, Institut Géographique National, Service de Géodésie et Nivellement.

[DUQUENNE 94] H. Duquenne : *Détermination de géoïdes locaux par géodésie intégrée et collocation*, présenté aux Journées de la Recherche de l'IGN, Saint-Mandé (F), mars 1994.

[JIANG 93] Z. Jiang : *Détermination du géoïde local par géodésie intégrée*, rapport de stage de DEA, Institut Géographique National, septembre 1993.

[JIANG 94 a] Z. Jiang : *Compensation combinant données du géoïde gravimétrique et GPS nivelé pour un géoïde national français*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LAREG, 1994.

[JIANG 94 b] Z. Jiang : *Etat d'avancement du logiciel PILI*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LAREG, 1994.

[LEMARIE, 1994] C. Lemarié : *Nivellement par GPS*, rapport de projet pluridisciplinaire, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LAREG et ENSG, 1994.

[SECHAUD 93] N. Séchaud : *Détermination d'un géoïde local par géodésie intégrée*, diplôme d'ingénieur, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LAREG, décembre 1993.

C.4.3. Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial

par Guy WÖPPELMANN et Claude BOUCHER

Les principales actions menées en 1994 dans le cadre de ce thème de recherche sont les suivantes :

- L'étude d'un réseau de marégraphes européen [BOUCHER, WÖPPELMANN 94a] dont l'objet serait d'assurer le meilleur rattachement possible : des différents réseaux nationaux de nivellement, du réseau REUN, et des différentes campagnes GPS réalisées à proximité des marégraphes, dans le repère de référence européen EUREF.

Le réseau EPTN permettrait en particulier :

- d'étudier la relation entre les hauteurs ellipsoïdales de EUREF, les hauteurs REUN et le géoïde européen,
- d'exprimer les résultats des campagnes régionales GPS de rattachement de marégraphes dans le système de référence de EUREF : l'ETRS89.

- L'étalonnage du marégraphe-totalisateur de Marseille (GLOSS n° 205) en août 1994, en vue de vérifier sa qualité et de contrôler son zéro instrumental. Il s'agit de la deuxième opération de ce type qui est effectuée depuis que cette station marégraphique est sous l'unique responsabilité de l'IGN, 1992. En outre, elle confirme la nécessité de surveiller la stabilité du zéro instrumental d'un marégraphe dont les mesures seront utilisées pour estimer les variations à long terme du niveau moyen des mers.

- La définition, l'organisation et l'exécution des travaux géodésiques préliminaires du projet NIVMER. Le programme est sous la responsabilité scientifique de C. Le Provost (IMG/LEGI), l'un des objectifs principaux étant de rattacher, dans le système de référence mondial de l'IERS, les marégraphes GLOSS dont la France a la responsabilité dans l'Océan Indien Sud.

- L'établissement d'un groupe de travail du CNFGG dont la mission serait de mener une réflexion, dans un cadre national, sur le thème "géodésie et niveau des mers". MM Boucher et Wöppelmann sont chargés respectivement de l'animation et du secrétariat du groupe.

- La participation active au groupe de travail du CNFGG "gravimétrie absolue" dont l'objet principal était de réfléchir à l'intérêt qu'il y aurait à acquérir en France un gravimètre absolu portable. Les mesures de pesanteur apporteraient une contrainte supplémentaire dans la détermination des mouvements verticaux estimés par géodésie spatiale à proximité des marégraphes. De plus, l'utilisation de techniques géométriques et gravimétriques permettraient de mettre en évidence des systématismes.

Publications et présentations

[WÖPPELMANN 94] G. Wöppelmann : *Détermination de la variation séculaire du niveau des mers : apport de la géodésie spatiale*, communication aux Journées Recherche 1993 de l'IGN, Saint-Mandé (F), 2 mars 1994.

[BOUCHER, WÖPPELMANN 94a] C. Boucher & G. Wöppelmann : *Proposal for a European Primary Tide gauge Network*, présenté au "EUREF TWG Meeting", Francfort (D), 15-16 décembre 1994.

[BOUCHER, WÖPPELMANN 94b] C. Boucher & G. Wöppelmann : *Apport de la géodésie à la surveillance du niveau des mers*, rapport technique IGN, RT/G 39, décembre 1994, à paraître dans le bulletin d'information de l'IGN, numéro spécial sur l'Environnement.

C.4.4. Le centre de données IGS à l'IGN

par Loïc DANIEL

L'IGN met en oeuvre un centre de données global de l'IGS. Son rôle est d'assurer la transmission et l'archivage des données nécessaires au fonctionnement du service, c'est à dire les observations du réseau de stations permanentes. Le centre de données est d'autre part le point d'accès des utilisateurs aux produits de l'IGS: éphémérides précises des satellites GPS, paramètres de rotation de la terre, fichiers explicatifs. Ces produits sont également archivés à l'IGN.

Les délais sont de l'ordre de 48 heures pour la disponibilité des observations du réseau permanent, 80 % des observations étant disponibles en 24 heures. Le délai de disponibilité des produits est dicté par le processus de calcul des différents centres d'analyse, il varie de 1 à 2 semaines pour les éphémérides individuelles de chaque centre et est de l'ordre de 20 jours pour l'éphéméride combinée IGS.

Les faits marquants de l'activité du centre de données en 1994 sont:

- démarrage officiel du service IGS en Janvier 1994, ce qui implique une contrainte forte du respect des spécifications, notamment en terme de flux de données en ce qui concerne le centre à l'IGN,
- augmentation du nombre de stations du réseau permanent prises en compte, ce nombre est de 50 à ce jour,
- mise à jour de la connexion INTERNET, le débit est maintenant de 132 Kbps,
- les données (observations et produits IGS) restent en ligne sur le serveur pour une durée minimum de 6 mois,
- mise en place d'un point de connexion par «ftp anonyme» (schubert.ign.fr) pour la mise à disposition des observations et produits aux utilisateurs,
- confirmation et montée en puissance de l'activité de distribution aux utilisateurs (voir graphe ci-dessous). Les données diffusées se répartissent en 50 % de produits et 50 % d'observations en terme de nombre de fichiers, à noter que les transferts de fichiers d'observations génèrent 80 % du flux en terme de volume.

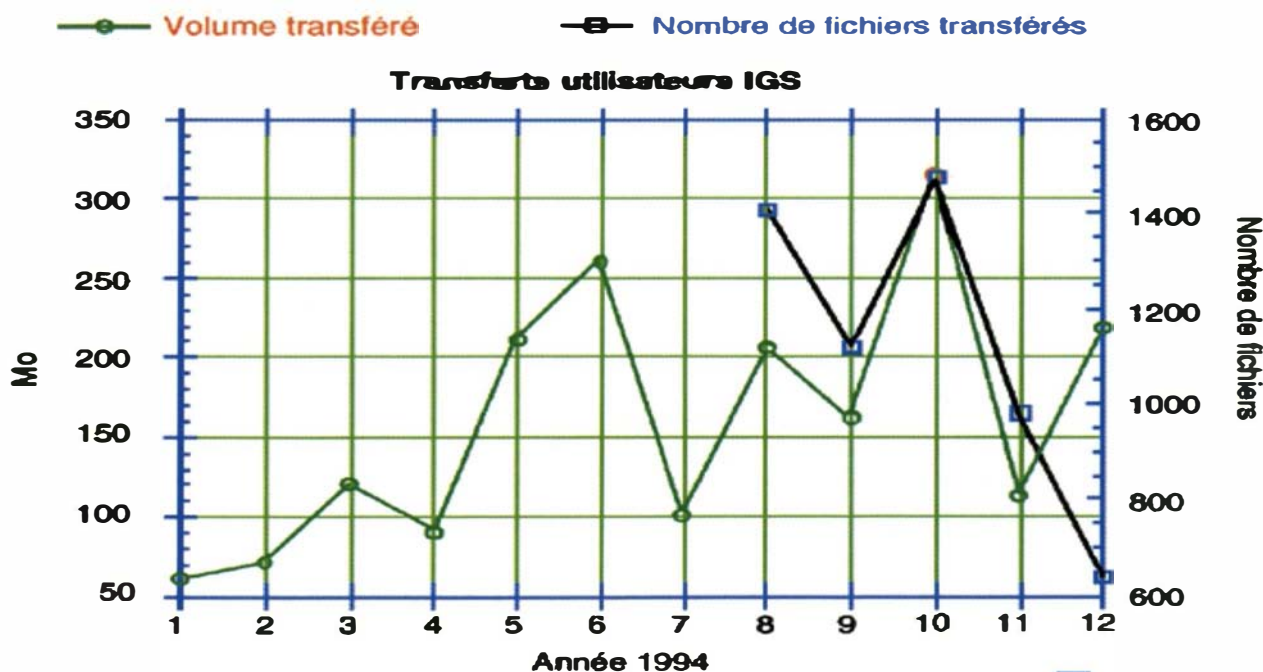


figure C.4.4.1

C.4.5. Étude des déformations du sol par des méthodes géodésiques dans le Sud-Est asiatique

par Thierry DUQUESNOY et Michel KASSER

Activité - résultats

Les recherches menées en 1994 se sont concentrées sur les grands décrochements actifs en domaine convergent par la répétition des mesures des réseaux géodésiques installés en 1991 le long de la faille des Philippines et de la grande faille de Sumatra. Par ailleurs, la reconnaissance et la première observation du réseau GEODYSSSEA sur tout le Sud-Est de l'Asie, opération financée par la Communauté Européenne, DG XII, seront sans doute terminées à la fin 1994.

La faille Philippine

Trois réseaux géodésiques avaient été installés en 1991. Deux de ces réseaux furent mesurés par méthode GPS et un par trilatération [BARRIER et al 91]. La répétition du réseau de trilatération effectuée en 1993 grâce à un don de matériel de la France aux organismes philippins et les résultats encourageants qui en ont résulté [DUQUESNOY et al 94] nous ont incité à répéter les réseaux de plus grandes mailles mesurés par GPS.

Les résultats préliminaires obtenus confirment la tendance mise en évidence en 1993, à savoir un mouvement continu de la faille au niveau de Leyte (dans la partie centrale des Philippines) avec un taux comparable avec ceux trouvés par d'autres techniques géologiques et géophysiques sur des échelles de temps beaucoup plus longues (milliers ou millions d'années). Par contre, les calculs préliminaires du réseau installé à Masbate, île plus au Nord, semblent indiquer que la faille est bloquée à ce niveau. De tels résultats ont une importance majeure en ce qui concerne la sismogénèse et l'appréciation du risque sismique sur une faille tectonique majeure.

Par ailleurs, un nouveau réseau sera installé sur Mindanao (sud des Philippines) en novembre 1994, avec la collaboration de l'IFAG, Francfort (Allemagne), en profitant de la présence du matériel GPS pour la mesure du réseau GEODYSSSEA déjà mentionné.

La Grande Faille de Sumatra

Une étude sismotectonique similaire à celle entreprise aux Philippines a débuté en 1991 en Indonésie avec l'installation de deux réseaux de points mesurés par géodésie spatiale et de deux réseaux de points mesurés par trilatération [DUQUESNOY et al 91]. Deux réseaux ont été installés au sud de Sumatra dans la région de Liwa et deux dans la partie centrale dans la région de Padang.

Un séisme de magnitude $M_w = 6,8$, localisé à Liwa, au milieu de l'un des réseaux installés, a incité à remesurer les réseaux installés en août 1991. Les résultats obtenus en septembre 1994, avec la participation de la Délégation aux Risques Majeurs, de l'ESGT, de l'institut de physique du globe de Paris (IPGP) et de l'IGN permettront de quantifier le déplacement cosismique de l'évènement de février 1994.

Publications

[DUQUESNOY et al 94] T. Duquesnoy, E. Barrier, M. Kasser, M. Aurelio, R. Gaulon, RS. Punongbayan, C. Rangin & the French-Philippines Cooperation Team : *Detection of creep along the Philippine Fault : First result of geodetic measurements in Leyte island (Central Philippines)*, in Geophysical Research Letters.

[DUQUESNOY et al 94] T. Duquesnoy, E. Barrier, M. Kasser, M. Aurelio, R. Gaulon, RS. Punongbayan & C. Rangin : *Detection of creep along the Philippine Fault by geodetic measurements*, in Annales Geophysicae.

[KASSER et al 94] M. Kasser, O. Bellier, T. Duquesnoy & M. Sébrier : *Geodetic survey of the great Sumatran Fault*, in Annales Geophysicae

[BARRIER et al 91] E. Barrier & T. Duquesnoy : *Etude Sismotectonique de la Partie Centrale de la Faille Philippine*, preliminary report, IGN, Saint-Mandé (F), 115 pages, 1991.

[DUQUESNOY et al 91] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Sébrier & M. Kasser : *Geodetic survey of the central and southernmost segments of the Great Sumatran Fault (Indonesia)*, preliminary report,IGN, Saint-Mandé (F), 1991.

La liste suivante contient les références des publications issues du programme de recherche 1994. Elle reprend les références données dans les différents articles du Bulletin. On peut se procurer la plupart de ces articles auprès du Service de la Recherche

Institut Géographique National
Service de la Recherche
BP 68
2 avenue Pasteur
F-94160 SAINT-MANDÉ

Téléphone : (1) 43 98 83 19

Télécopie : (1) 43 98 81 71

Courrier électronique : sombris@cogit.ign.fr

Livres, brochures

[BOUCHER 94] Cl. Boucher (directeur de la publication), *bilan recherche 93*, Bulletin d'information de l'IGN n° 62, 1994.

[CAVERO 94] P.J.Cavero (rédacteur), *Projet Capital Humain et Mobilité*, résumés de Euroconférence SIG, Commission des Communautés Européennes, Institut Géographique National, Saint-Mandé (F), 19-21 septembre 1994.

Thèses de doctorat

[DANG 94] T. Dang : *Interprétation et restitution automatique des bâtiments isolés à partir d'un couple stéréoscopique d'images aériennes*. thèse, SR 940036/C-THE, 1994.

[DESEILLIGNY 94b] M. Pierrot-Deseilligny : *Lecture automatique de cartes*, thèse Université Paris-5, Université René Descartes, directeur de thèse : G. Stamon, soutenue le 6 octobre 1994, 940030/C-THE, 1994.

Publications

[BEAUVILLAIN, JAMET 94] E. Beauvillain & O. Jamet : *Evaluation de la qualité d'un MNT issu de corrélation automatique de photographies aériennes*, Symposium SFPT-RSS : "Qualité de l'interprétation des images de télédétection pour la cartographie", Grignon (F), 1-3 sept. 1994, SR 940020/C-COM, in Bulletin SFPT n° 137 (1995-1) 1994.

[BOUCHER, WÖPPELMANN 94a] C. Boucher & G. Wöppelmann : *Apport de la géodesie à la surveillance du niveau des mers*, à paraître dans le Bulletin d'Information IGN, spécial Environnement en 1996, SR 940031/G-COM, 1994.

[DANG et al 94d] T. Dang et al : *Using Disparity Models and Object Models to improve Stereo Reconstruction of Buildings*, in Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF), pp. 167-173, SR 940022/C-COM, septembre 1994.

[LE MEN, JAMET 94] H. Le Men & O. Jamet : *Évaluation de la qualité d'interprétation d'images SPOT en OS*, in Bulletin de la SFPT n° 137 (1995-1), SR 940051/C-COM, septembre 1994.

[RUSKONÉ et al 94b] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road Extraction System using the Connectivity Properties of the network*, in Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF), SR 940026/C-COM, septembre 1994.

[WILLIS, BOUCHER 94] P. Willis & C. Boucher : *L'unification des références géodésiques : l'exemple du tunnel sous la Manche*, 3ème CITOP, Paris-Londres, novembre 1994, IGN CC/G n° 611, à paraître dans la revue XYZ de l'Association Française de Topographie, SR 940028/G-COM, 1994.

[YUNCK et al 94] T. Yunck, Wl. Bertiger, SC. Wu, Y. Bar-Sever, EJ. Christiansen, BJ. Haines, SMJ. Lichten, RJ. Muellerschoen, Y. Vigue & P. Willis : *First Assessment of GPS-Based reduced dynamic orbit determination on Topex/Poseidon*, in Geophys. Res. Lett., 1994, 21, 7, 541-544, IGN CC/G n° 60, SR 940024/G-COM, 1994.

Communications

- [AIRAULT 94a] S. Airault : *Extraction du réseau routier sur images aériennes*, Journées Recherche de l'IGN, Saint-Mandé (F), SR 940008/C-COM, mars 1994.
- [AIRAULT 94c] S. Airault : *Road detection from aerial Images : a Cooperation between local and global Methods*, European Signal and Image Processing for Remote Sensing, Rome (I), 26-30 septembre 1994, SR 940019/C-COM, 1994.
- [AIRAULT, JAMET 94a] S. Airault & O. Jamet : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aériennes*, RFIA, Paris (F), vol. 1, pp. 519-531, SR 940001/C-COM, janvier 1994.
- [AIRAULT, JAMET 94b] S. Airault & O. Jamet : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aériennes*, Traitement du Signal (TS), SR 940004/C-COM, 1994.
- [ALTAMIMI et al 94a] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Duhem : *Activity Report of the ITRF Section of the IERS Central Bureau : ITRF92 and ITRF-P solutions*, 1994 IERS Workshop, Paris (F), SR 940042/G-COM, mars 1994.
- [ALTAMIMI et al 94b] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Duhem : *Terrestrial Reference Frame 1993 (ITRF93) : Consistency with the IERS Earth Orientation Parameters*, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), SR 940043/G-COM, décembre 1994.
- [BORDES 94a] G. Bordes : *Utilisation d'une base de données géographique*, Journées Recherche de l'IGN, Saint-Mandé (F), SR 940007/C-COM, mars 1994.
- [BORDES et al 94] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Interpretation of aerial imagery driven by a cartographic DB*, Euroconference SIG, ENSG, IGN, Saint-Mandé, SR 940049/C-ACT, septembre 1994.
- [BOUCHER 94a] C. Boucher : *Overview of possible improvements of ITRF coordinates*, 1994 IERS Workshop, Paris (F), SR 940014/G-COM, mars 1994.
- [BOUCHER 94b] C. Boucher : *A proposal from the IERS Terrestrial Frame Section to include regional networks in their analysis strategies*, 1994 IGS Workshop, Paris (F), SR 940037/G-COM, mars 1994.
- [BOUCHER 94c] C. Boucher : *The Realizations of the International Terrestrial Reference System (ITRS) : A challenge for a joint IERS/IGS solution*, IGS Workshop, Pasadena (USA), SR 940038/G-COM, décembre 1994.
- [BOUCHER et al 94] C. Boucher, J. Adam, E. Gubler, W. Gurtner, H. Hornik, H. Seeger & H. van Der Marel : *Activity Report of the EUREF Technical Working Group : An example of regional processing for Europe*, 1994 IGS Workshop, Saint-Mandé (F), Saint-Mandé (F), mars 1994.
- [BOUCHER, DUFOUR 94] C. Boucher & JP. Dufour : *Contribution of DORIS to the IERS : Overview of existing solutions*, 1994 IERS Workshop, Paris (F), SR 940017/G-COM, mars 1994.
- [BOUCHER, WÖPPELMANN 94b] C. Boucher et G. Wöppelmann : *Proposal for a European Primary Tide Gauge Network*, Euref TWG Meeting, Francfort (D), SR 940030/G-COM, 15-16 décembre 1994.
- [DANG et al 94a] T. Dang, O. Jamet & H. Maître : *Reconnaissance de bâtiments par groupement de primitives contraint par un modèle de disparités*, 9ème Congrès RFIA, Paris (F), pp. 497-506, SR 940002/C-COM, janvier 1994.
- [DANG et al 94b] T. Dang et al. : *An Image Segmentation Technique based on Edge-preserving Smoothing filter and Anisotropic Diffusion*, in Proceedings IEEE Southwest Symposium Image Analysis & Interpretation, Dallas, Texas (USA), pp. 65-69, SR 940015/C-COM, avril 1994.
- [DANG et al 94c] T. Dang et al : *Applying Perceptual Grouping and Surface Models to the Detection and Stereo Reconstruction of Buildings in aerial Imagery*, ISPRS spatial Information from digital Photogramm. & Computer Vision, Com. III/2, München (D), 5-9 sept 1994, vol. 30, T1, pp. 165-172, SR 940021/C-COM, 1994.
- [DANG et al 94e] T. Dang, O. Jamet & H. Maître : *Using Stereo Matching and Perceptual Grouping to detect Buildings in aerial Images*, "Conférence Image & Signal Processing for Remote Sensing, Rome (I), SR 940023/C-COM, 26-30 septembre 1994.
- [DANG et al 94f] T. Dang, O. Jamet & H. Maître : *An Image Segmentation Technique based on Edge-preserving smoothing filter and Anisotropic Diffusion*, IEEE Southwest Conference, Dallas (USA), SR 940027/C-COM, 1994.
- [DAVID 94a] B. David : *Data description : Quality*, Meeting, CEN/TC287/SWG2.2, Southampton (GB), SR 940001/Q-COM, 25-27 avril 1994.
- [DESEILLIGNY 94a] M. Pierrot-Deseilligny : *Lecture automatique des écritures sur cartes scannées*, 940013/C-COM, 1994.
- [DESEILLIGNY et al 94] M. Pierrot-Deseilligny et al : *Characters String Recognition on Maps. A Method for high Level Reconstruction*, SR 940034/C-COM, 1994.
- [DISSARD, RUSKONÉ 94] O. Dissard & R. Ruskoné : *Informations localisées issues de la photogrammétrie numérique et de la vision par ordinateur*, compte-rendu du Symposium de la Commission III de la SIPT, München (D), 5-9 septembre 1994, 4 pages, in Bulletin de la SFPT n° 136, SR 940037/C-CRD, 1994.
- [GUÉRIN et al 94b] P. Guérin et al : *Interprétation conjointe cartes scannées et images aériennes*, 3ème Colloque National Ecrit et Document (CNED), Rouen (F), juillet 1994, pp. 185-194, SR 940017/C-COM, 1994.
- [GUÉRIN et al 94c] P. Guérin, Moissinac, Blach : *Image interprétation using symbolic data*, 7th ESPC, Edinburg (GB), SR 940048/C-COM, septembre 1994.
- [LATARGET et al 94a] S. Latarget, C. Mach & S. Motet : *Gestion de l'historique de l'information localisée par des mutations*, GdR MIS-Cassini, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940032/S-COM, 1994.
- [LECORDIX et al 94b] F. Lecordix, C. Plazanet, F. Chirié, JP. Lagrange T. Banel & Y. Cras : *Automated Name Placement on Map under high Quality cartographic Constraints*, 10 pages, SR 940019/S-COM, 1994
- [LECORDIX et al 94] F. Lecordix, C. Plazanet, F. Chirié, JP. Lagrange T. Banel & Y. Cras : *Placement automatique des écritures d'une carte avec une qualité cartographique*, IGN et EDS-GFI, EGIS'94, Paris (F), in Proceedings, pp. 22-31, SR 940018/S-COM, mars-avril 1994.

- [MONIER 94a] P. Monier : *Representation and Characterization of Relief Information for Generalization*, GIS Euroconference, IGN, ENSG, Saint-Mandé (F), 6 pages, SR 940020/S-COM, 21 septembre 1994.
- [PLAZANET 94b] C. Plazanet : *Shape Characterisation for the Generalization of linear geographical Objects*, GIS Euroconference, IGN, Saint-Mandé (F), 5 pages, SR 940035/S-COM, septembre 1994.
- [PLAZANET 94] C. Plazanet, J.G. Affholder, J.P. Lagrange & A. Ruas : *Représentation et analyse de formes linéaires pour l'automatisation de la généralisation cartographique*, EGIS'94, Paris (F), in Proceedings, pp. 1112-1121, SR 940017/S-COM, mars-avril 1994.
- [RAYNAL et al 94a] L. Raynal et al : *Building an OO GIS prototype : some experiments with GéO₂*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940005/S-COM, 1994.
- [RAYNAL, STRICHER 94] L. Raynal & N. Stricher : *Base de données multi-échelles : association géométrique des tronçons de route de la BDCarto et de la BDTopo*, EGIS'94, Paris (F), in Proceedings, pp. 301-307, SR 940012/S-COM, mars-avril 1994.
- [RUAS, LAGRANGE 94] A. Ruas & J.P. Lagrange : *Modélisation pour l'automatisation de la généralisation cartographique*, EGIS'94, Paris (F), in Proceedings, pp. 37-47, SR 940001/S-COM, mars-avril 1994.
- [RUSKONÉ et al 94a] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road Network Interpretation : a topological Hypothesis driven System*, Euroconférence-SIG, thème n° 1 : Reconnaissance de formes sur photographies numériques (Pattern Recognition from aerial Photographs), SR 940025/C-COM, 1994.
- [RUSKONÉ et al 94c] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road Network Interpretation : a topological Hypothesis driven System*, ISPRS Munich (D), 940046/C-COM, septembre 1994.
- [SCHORTER et al 94a] G. Schorter, L. Raynal & F. Vauglin : *GéO₂ : Module de superposition*, les Journées de la Recherche Cassini, Lyon (F), SR 940010/S-COM, juin 1994.
- [VAUGLIN 94a] F. Vauglin : *Modélisation de localisation*, Journée Recherche du CNIG, Montpellier (F), 6 pages, SR 940014/S-COM, mai 1994.
- [VAUGLIN 94b] F. Vauglin : *Modélisation de la précision géométrique dans les SIG*, ORC BDS, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940022/S-COM, 17-18 juin 1994.
- [VAUGLIN 94h] F. Vauglin : *Modelling geometric Accuracy in GIS IGN*, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940033/S-COM, 1994.
- [WILLIS 94a] P. Willis : *Le système DORIS : Résultats récents de la mission océanographique Topex/Poseïdon*, Journée Recherche de l'IGN, SR 940004/G-COM, mars 1994.
- [WILLIS 94b] P. Willis : *Recent results for DORIS processing at IGN using the GIPSY/OASIS II software : Stations coordinates and Earth rotation determination*, IERS/IGS Workshop, Paris (F), March 1994, CC/G n° 604, SR 940020/G-COM, 1994.
- [WILLIS et al 94a] P. Willis, C. Boucher, S. Botton & H. Fagard : *The RRF Network : A densification of the ITRF for France*, IERS/IGS Workshop, Paris (F), March 1994, CC/G n° 603, SR 940019/G-COM, 1994.
- [WILLIS et al 94b] P. Willis, C. Boucher, S. Botton, M. Le Pape, H. Fagard & Z. Altamimi : *The RRF network : Status report of the EUREF-F 93 campaign and its inclusion in the RRF*, EUREF Workshop, Varsow (P), June 1994, IGN CC/G n° 606, SR 940034/G-COM, 1994.
- [WILLIS et al 94c] P. Willis, C. Boucher, J.P. Dufour, Z. Altamimi & N. Bondarenco : *The Contribution of the DORIS System to the Global Terrestrial Reference Frame DOSE Meeting*, Boulder (USA), SR 940025/G-COM, septembre 1994.
- [WILLIS, BERTIGER 94] P. Willis & W. Bertiger : *Processing DORIS data with the GIPSY/OASIS II software : recent results for point positioning and orbit determination*, Institute of Navigation, National Technical Meeting, Navigating the Earth and Beyond, San Diego (USA), janvier 1994, CC/G n° 596, SR 940001/G-COM, 1994.

Rapports internes, notes techniques, rapports d'étude

- [AFFHOLDER 94] J.G. Affholder : *Une modélisation du linéaire routier en vue de la généralisation*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 15 pages, SR 940003/S-RAP, février 1994.
- [AFFHOLDER 94] J.G. Affholder : *Outils algorithmiques pour la généralisation*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940008/S-COM, 1994.
- [AIRAULT 94b] S. Airault : *Calcul de la géométrie précise des axes de route*, SR 940011/C-COM, 1994.
- [BEAUVILLAIN, THONON 94] E. Beauvillain & M. Tonon : *Aerotriangulation using digitized Images*, version 2, OEEPE Experience, IGN, Saint-Mandé (F), SR 940006/C-COM, 1994.
- [BONDARENCO 94] N. Bondarenco : *Estimation du délai troposphérique dans le traitement des données DORIS*, rapport d'étude, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LAREG, SR 940036/G-COM, octobre 1994.
- [BORDES 94b] G. Bordes : *Fusion en imagerie aérienne et satellitaire*, SR 940038/C-COM, 1994.
- [BOUCHER et al 94b] C. Boucher, Z. Altamimi & L. Duhem : *Results and Analysis of the ITRF93*, SR 940041/G-COM, 1994.
- [COGIT 94] *Minutes du séjour de Robert Weibel (CH) du 28 mars au 22 avril 1994 au COGIT*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 118 pages, SR 940049/S-RAP, 1994.
- [DAVID 94c] B. David : *Modèles conceptuels pour la géométrie et pour la qualité de l'information géographique*, Compte-rendu du CEN/TC287/SWG2.2, GISDATA, Vienne (A) SR 940005/Q-COM, novembre 1994.
- [DUCLoux 94] J. Ducloux : *Aerotriangulation automatique d'images numériques*, SR 940009/C-COM, 1994.

- [FASQUEL 94a] P. Fasquel : *Cours sur la qualité interne d'une base de données géographique aux ingénieurs des Travaux Géographiques de l'Etat de l'ENSG, étape vers l'établissement d'un cours plus complet*, IGN, Service de la Recherche, Projet Qualité des Bases de Données, SR 94006/Q-CNF, décembre 1994.
- [GUÉRIN 94] P. Guérin : *Apport des cartes existantes*, SR 940010/C-COM, 1994.
- [GUÉRIN et al 94a] P. Guérin, S. Airault ; H. Maître & O. Jamet : *Recalage de données vecteur sur une image aérienne en vue d'une extraction automatique du réseau routier*, SR SR 940014/C-COM, 1994.
- [GUIAVARC'H 94] P. Guiavarc'h : *Étude d'une chaîne de corrélation numérique*, notice utilisateur, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, 1994.
- [HANGOUËT 94] JF. Hangouët : *Calcul de la distance de Hausdorff sur des données vecteur dans le plan*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 36 pages, SR 940004/S-RAP, juillet 1994.
- [JAYER 94] R. Jayer : *Segmentation des images aériennes et l'interprétation de la végétation*. rapport d'activité et calendrier prévisionnel, année universitaire 1993-1994, directeur de thèse : G. Stamon, Paris-6, SR 940005/C-RAP, 1994.
- [JULIEN 94] P. Julien : *Traitements altimétriques (Modèles Numériques de Terrain)*, cours du DEA-SIG, ENSG, IGN, SR 940033/C-CNF, 1994.
- [LE MEN 94] H. Le Men : *Géométrie de l'occupation du sol de la BDCarto*, rapport interne, Direction Technique, SR 940007/R-RATP, 23 mars 1994.
- [LECORDIX 94b] F. Lecordix : *Placement automatique des kilométrages et informations diverses sur le placement automatique des écritures*, compte-rendu de recherche, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 5 pages, SR 940052/S-CRD, 1er novembre 1994.
- [MONIER 94b] P. Monier : *Representation and Characterization of Relief Information for Generalization*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940038/S-COM, 1994.
- [MONIER 94c] P. Monier : *Généralisation et orographie*, notes de travail, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 32 pages, SR 940055/S-RAP, janvier 1994.
- [PLAZANET 94c] C. Plazanet : *Caractérisation des formes linéaires pour la généralisation. Comment décririez-vous cet arc ?*, table ronde, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940042/S-CNF, 15 novembre 1994.
- [PLAZANET 94d] C. Plazanet : *Modélisation de la géométrie des objets linéaires en vue de leur généralisation automatique*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 10 pages, SR 940047/S-COM, 1994.
- [RAYNAL et al 94b] L. Raynal et al. : *GéO₂ et le Multi-Echelles*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940006/S-COM, 1994.
- [ROUSSEAU 94] D. Rousseau, T. Rousseau & F. Lecordix : *Expertise de MAP Generalizer, logiciel de généralisation interactive d'Intergraph*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 30 pages, SR 940051/S-RAP, décembre 1994.
- [RUAS 94] A. Ruas : *Modélisation pour l'automatisation de la généralisation cartographique*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940001/S-COM, 1994.
- [RUAS, HANGOUËT 94] A. Ruas & JF. Hangouët : *Notice sur les développements sous ILOG*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 22 pages, SR 940023/S-BRO, 27 juin 1994.
- [RUSKONÉ 94] R. Ruskoné : *Détection automatique des amorces de routes*, SR 940012/C-COM, 1994.
- [SCHORTER 94a] G. Schorter : *GéO₂ : Base de Données multi-échelles*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940009/S-COM, 1994.
- [SCHORTER 94b] G. Schorter : *Manuel GéO₂, version 5*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, rapport interne, SR 940055/S-MAN, janvier 1994
- [SCHORTER et al 94b] G. Schorter : *GéO₂ : Module de superposition*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940037/S-COM, 1994.
- [VAUGLIN 94c] F. Vauglin : *Compte-rendu de la visite de Nicholas Chrisman au COGIT + annexe 1*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 940026/S-CRD, 1994.
- [VAUGLIN 94i] F. Vauglin : *Compte-rendu de la visite au COGIT de Francis Harvey*, 14 pages, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940036/S-CRD, 1-2 septembre 1994.
- [WANG 94b] P. Wang : *Extraction des lignes caractéristiques dans une image de contours d'une photographie aérienne*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940054/C-STA, 1994.
- [WILLIS 94] P. Willis : *A proposal to include DORIS as a new technique in IERS*, rapport soumis au Directing Board de l'IERS au Workshop IERS, SR 940037/G-COM, mars 1994,

Rapports de stage

[BOISEL 94] D. Boisel : *Etude et réalisation d'un module de compression d'images*, rapport de stage de formation d'analyste informaticien, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940018/C-STA, 1994.

[BOUIN 94] MN. Bouin : *Analyse de données astronométriques et climatiques*, rapport de DEA-SIG, lieu du stage : Observatoire de Paris, SR 940021/G-STA, juin 1994.

[CLINCKX 94] P. Clinckx : *Maquette de saisie semi automatique du réseau routier*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 9400/C-STA, 1994.1994.

[DAMOUR 94] S. Damour : *Généralisation du bâti : la simplification des contours*, DEA SIG, ENSG, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 54 pages, SR 940024/S-STA, 1994.

[DERRAC 94] C. Derrac : *Test d'implémentation de l'opérateur d'agrégation sur les SIG Smallworld, pour un modèle hiérarchique de données traitant de zones végétales des Hautes-Alpes*, DEA SIG, ENSG, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 64 pages, SR 9400 /S-STA, 26 septembre 1994.

[FASQUEL 94a] P. Fasquel : *Expression de contrôle de cohérence géographique dans un langage indépendant des SIG*, DEA SIG, ENSG, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 62 pages, SR 940039/S-STA, 26 septembre 1994.

[FRITSCH 94] E. Fritsch : *Recherche d'outils et de représentations pour la généralisation*, stage de DEA SIG, ENSG, IGN, effectué au Service de la Recherche, laboratoire COGIT et au geographisches Institut de l'Université de Zürich (CH), SR 940021/S-STA, mars-juin 1994.

[GRENIER 94 a] F.Grenier : *Interprétation assistée pour l'occupation du sol*, mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Agronomie Approfondie "Hydraulique et climatologie agricoles" (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940031/C-STA, 1994.

[LATARGET 94a] S. Latarget : *Un modèle Orienté-Objet pour la gestion de l'Historique des Bases de Données Géographique*, DEA SIG, ENSG, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 40 pages, SR 940025/S-STA, 30 juin 1994.

[LECOURT 94] F. Lecourt : *Reconnaissance des rangées d'arbres sur les images aériennes*, DEA SIG, IGN, ENSG, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940047/C-STA, 1994.

[MACH 94] C. Mach : *Gestion de l'historique pour données géographiques. Utilisation d'un système de gestion de bases de données Orientée-Objet. Implantation d'un modèle Orienté-Objet*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940034/S-STA, 1994.

[MAROT 94] JM. Marot : *Positionnement automatique des kilométrages*, stage de DESS Système et Communication Homme-Machine, Université Paris-Sud d'Orsay, 46 pages, SR 940041/S-STA, 1994.

[NGUYEN 94] TT. Nguyen : *Intégration et extension d'un module de superposition dans un SGBD Orienté-Objet*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 940002/S-STA, 1994.

[PAVET 94] L. Pavet : *Reconnaissance des écritures sur cartes scannées*, mémoire en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur ESGT, SR 940016/C-STA, 1994.

[VAUGLIN 94j] F. Vauglin : *Des fractales pour des cartes. Rappels théoriques et pratiques*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 25 pages, SR 940040/S-STA, 30 septembre 1994.

Directeur de la Publication : Jacques POULAIN
Rédacteur en Chef : Serge MOTET

Imprimé à l'Institut Géographique National
Copyright Bulletin d'Information de l'I.G.N.

136 bis, rue de Grenelle - 75700 Paris 07 SP
Tél. : 43.98.80.00

Imprimerie de l'INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL

Dépôt légal 4^e trimestre 1995
N° d'édition : 172 - N° d'impression : 193

