



**HAL**  
open science

## La recherche à l'Institut Géographique National : activité 1995

Serge Motet, Daniel Piquet-Pellorce, Sylvie Lamy, Christian Thom, Claude Boucher, Sylvain Airault, Caroline Baillard, Edouard Beauvillain, Ghislaine Bordes, Olivier Dissard, et al.

### ► To cite this version:

Serge Motet, Daniel Piquet-Pellorce, Sylvie Lamy, Christian Thom, Claude Boucher, et al.. La recherche à l'Institut Géographique National : activité 1995. Bulletin d'information de l'IGN N°65. 1996. hal-02373015

**HAL Id: hal-02373015**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02373015v1>**

Submitted on 20 Nov 2019

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

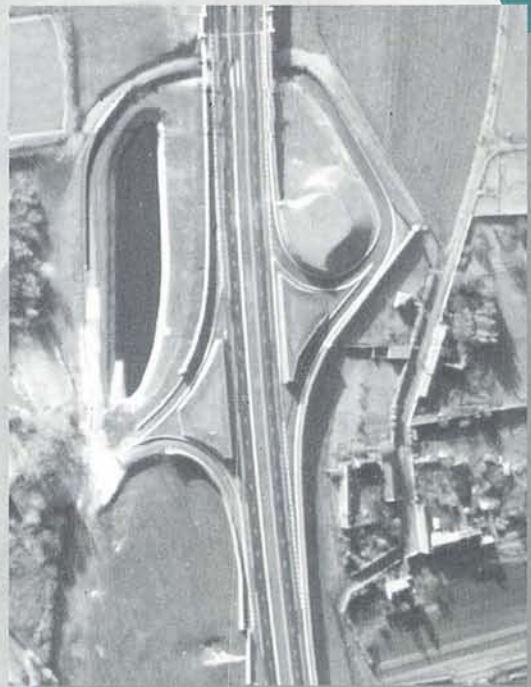
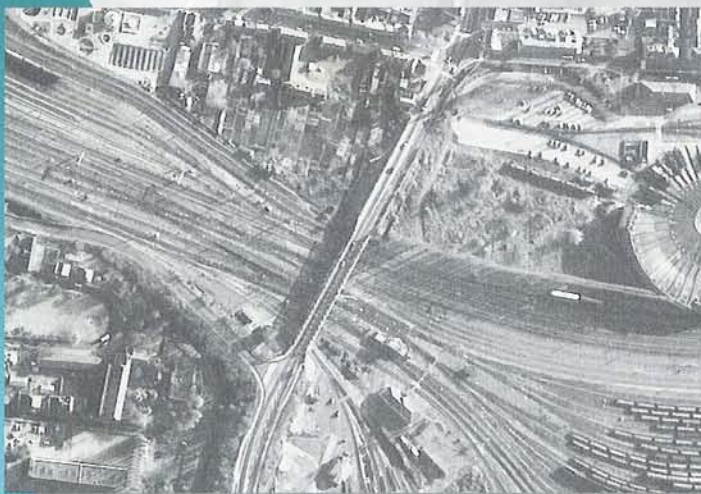
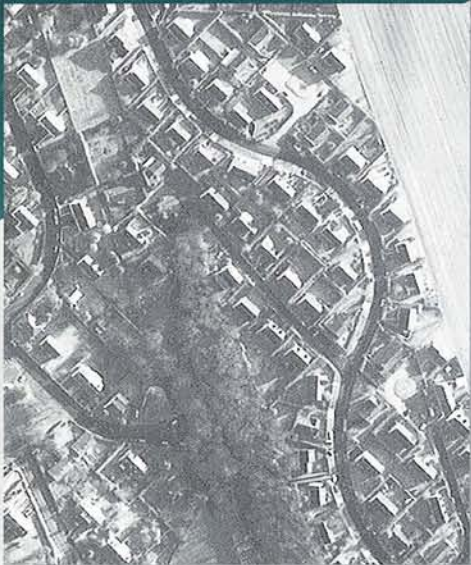
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# BI

INSTITUT  
GÉOGRAPHIQUE  
NATIONAL

BULLETIN D'INFORMATION DE L'IGN

## Recherche 95



65



La recherche à l'Institut Géographique National  
Activité 1995



# La recherche en 1995

---

01 Classement SR-IGN : 960001/R-LIV

02 Type : Livre

03 Nom et adresse du directeur de la publication :

Jacques Poulain

IGN

B.P. 68

94160 Saint-Mandé

04 Rédacteur en chef:

Serge Motet

05 Réalisé à

IGN

B.P. 68

94160 Saint-Mandé

06 Titre : Bulletin d'information de l'IGN

07 Date d'édition : 1996

08 Edition et Version : 1

13 Numéro dans le volume : 65

Résumé : Ce numéro est consacré aux activités de recherche de l'IGN en 1995. Il dresse le bilan des recherches en traitement d'images, photogrammétrie, instrumentation, SIG, cartographie et géodésie. On traite plus particulièrement des sujets suivants :

- la mise à jour par SPOT,
- l'extraction du bâti des prises de vues aériennes,
- la caméra aéroportée numérique,
- la télémétrie laser,
- la précision photogrammétrique,
- les données multi-échelles,
- la généralisation cartographique numérique,
- le système DORIS,
- le géoïde.

Mot clé principal : IGN

Mots clés : recherche, traitement d'images, photogrammétrie, instrumentation, SIG, cartographie et géodésie.

BDTOPO, BDCARTO et GEOROUTE sont des marques déposées de l'IGN.

## Note de la Rédaction

*Le n° 63 du Bulletin d'information de l'IGN est un numéro consacré entièrement au Colloque du GDTA (Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale) pour ses vingt ans. Un tirage limité ne nous a pas permis d'en destiner aux abonnés. Cependant, les personnes intéressées peuvent s'en procurer un exemplaire :*

*GDTA, 18 avenue Edouard Belin, F-31005 TOULOUSE cedex*

# Table des matières

<b>A. La recherche à l'IGN</b> .....	<b>1</b>
Priorités de recherche .....	1
A propos du bulletin n° 65 .....	2
Structure de la recherche à l'IGN .....	2
Evolution des effectifs .....	3
Répartition des moyens .....	4
La vie de la recherche .....	4
<b>B. Quelques actions marquantes</b> .....	<b>6</b>
B.1.1 Approche d'une mise à jour automatique pour l'occupation du sol BDCarto à l'aide d'images SPOT .....	6
Description du processus .....	7
Analyse des erreurs .....	7
Apport de solutions .....	10
B.1.2 Appariement stéréoscopique d'images aériennes et extraction du sursol en milieu péri-urbain .....	14
Approche proposée pour la mise en correspondance .....	14
Extraction du sursol .....	17
B.2.1 Fabrication d'une caméra numérique aérienne .....	20
Principales caractéristiques de la nouvelle caméra .....	20
Optique, ordinateur pilote et système de sauvegarde .....	21
La mission du 15 janvier 1996 .....	22
B.2.2 Prototype d'instrument aéroporté de télémétrie laser à champ large .....	26
Description du procédé .....	27
Avancement dans la validation du procédé .....	29
B.2.3 Etude par simulation de prises de vue spatiales de la précision photogrammétrique d'un capteur à balayage à haute résolution .....	33
Corrélation visuelle et corrélation automatique .....	34
Les problèmes .....	34
Sites étudiés .....	35
Résultats de l'étude .....	37
B.3.1 Constitution d'une base de données multi-échelles .....	44
Les liens de correspondance .....	45
Intégration de schémas .....	46
Appariement des données .....	47
B.3.2 Plate-forme de généralisation PlaGe et application à la caricature .....	50
Eléments de base de PlaGe .....	51
Algorithmes pour la caricature .....	55
Approche pour l'automatisation .....	58
B.3.3 Traitement des effets de bord des algorithmes de généralisation : mécanismes de déplacement .....	60
Modélisation des relations de proximité .....	61
Mécanisme de propagation d'une déformation linéaire sur des objets isolés .....	62
B.4.1 Le système DORIS : Applications actuelles à l'IGN et perspectives d'avenir .....	65
Présentation générale du système DORIS : Contexte et objectifs .....	65
Résultats actuels DORIS pour le positionnement précis .....	66
Les autres applications du système DORIS .....	68
DORIS et GPS : compétition ou complémentarité ? .....	70
Perspectives d'évolution du système DORIS .....	71
B.4.2 Le géoïde des Alpes françaises méridionales .....	73
Calcul du Géoïde gravimétrique .....	74
Comparaison du quasi-géoïde gravimétrique et d'anomalies d'altitude dérivées de nivellement et GPS .....	78
Ajustement combiné de la solution gravimétrique et du réseau de points GPS nivelés .....	79

<b>C. Bilan des actions de recherche</b> .....	<b>83</b>
<b>C.1 Image et photogrammétrie</b> .....	<b>83</b>
C.1.1 Lecture automatique de cartes .....	84
C.1.2 Conception et mise en œuvre d'algorithmes pour la vision stéréoscopique .....	87
C.1.3 Systèmes d'interprétation d'images aériennes .....	87
C.1.4 Application semi-automatique d'aide à la restitution de la BDTopo .....	94
<b>C.2 Instrumentation</b> .....	<b>101</b>
C.2.1 Nouvelles technologie pour la télémétrie laser satellite .....	101
C.2.2 Exploitation cartographique d'images radar .....	102
C.2.3 Emploi en métrologie de cartes GPS consommables .....	104
<b>C.3 SIG et Cartographie</b> .....	<b>105</b>
C.3.1 Modèle d'historique pour l'information géographique .....	106
C.3.2 Modélisation de la précision géométrique .....	107
C.3.3 Algorithmes de généralisation .....	109
C.3.4 Problèmes de modélisation liés à la généralisation .....	110
C.3.5 Généralisation automatique : approche à base de connaissances .....	112
C.3.6 Vers une généralisation automatique du relief .....	113
C.3.7 Placement automatique des écritures sur une carte .....	115
<b>C.4 Géodésie</b> .....	<b>117</b>
C.4.1 Systèmes de référence .....	120
C.4.2 Géoïde .....	122
C.4.3 Niveau des mers .....	123
C.4.4 Doris .....	124
C.4.5 Analyse GPS .....	125
C.4.6 Le centre global de l'IGS à l'IGN .....	127
C.4.7 Etude des mouvements tectoniques actuels par méthodes géodésiques .....	130
<b>D. Publications</b> .....	<b>132</b>

par Serge Motet

Ce bulletin dresse le bilan des actions entreprises en 1995 par l'Institut Géographique National (IGN) dans le cadre de sa mission de recherche.

## Priorités de recherche

Depuis sa création, l'IGN joue un rôle actif en recherche appliquée dans tous les domaines de l'information géographique. Par sa double mission de recherche et de production, l'IGN est en mesure de renouveler les techniques de production et d'élaborer de nouveaux produits issus de la recherche.

Les priorités de recherche s'inscrivent dans un contexte général d'informatisation de la cartographie et de la documentation géographique. Elles sont décrites dans le "schéma directeur de la recherche à l'IGN".

La recherche de l'IGN se développe parallèlement aux missions de l'établissement et en particulier à la production de bases de données géographiques. En particulier l'IGN a entrepris la constitution la Base de Données Topographiques (BDTOPO) de précision métrique. Son achèvement à moyen terme (2010) permet d'engager des recherches en visant une mise en application dans trois ou cinq ans. C'est dans ce cadre que sont développés à la fois des capteurs (caméra numérique), des méthodes de traitement d'images et de photogrammétrie et des outils de cartographie automatique.

En aval de la saisie, l'IGN étudie l'exploitation ses bases de données. Une part importante de l'activité de recherche traite de la cartographie et des systèmes de gestion de base de données localisées.

Enfin, quelques recherches sont menées dans des domaines où les compétences de l'IGN peuvent contribuer au rayonnement scientifique international du pays, en particulier en sciences de la terre.

## Image et photogrammétrie

La BD TOPO est saisie en trois dimensions sur des photographies aériennes (suivi d'un complètement sur le terrain). Les recherches portent sur cette *saisie photogramétrique*. Elles s'appuient sur des outils d'analyse d'image et sur les techniques photogramétriques (permettant d'obtenir une géométrie tridimensionnelle par la vision stéréoscopique de deux images du même lieu prises de points de vue différents).

Les actions de recherche couvrent plusieurs aspects de la topographie et visent le moyen et long terme.

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

D'autre part, différents thèmes sont traités. La restitution du relief par corrélation automatique et la restitution des routes sont les sujets les plus avancés. La détection du bâti est également abordée.

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 utilisant une matrice CCD comme capteur. Ce capteur a une dynamique très supérieure aux clichés argentiques. Il s'insère beaucoup plus simplement dans un processus totalement numérique.



## Système d'Information Géographique (SIG)

Les recherches portent sur l'amélioration des systèmes actuels de gestion de données localisées qui s'appuie sur des systèmes de gestion de bases de données (SGBD) et en particulier sur les SGBD orienté-objet. Les domaines de recherche sont :

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

## Généralisation cartographique

C'est la dernière étape du passage au numérique. L'objectif est de produire de façon automatique, des cartes claires et lisibles à partir des BD de l'IGN. Il s'agit de simplifier certains détails, d'en mettre d'autres en évidence, de réduire les superpositions et les confusions. Les options étudiées sont l'approche algorithmique et l'approche 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.

## A propos du bulletin n° 65

Le bulletin dresse un bilan de la recherche menée à l'IGN en 1995. 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 1995 pour informer les chercheurs qui travaillent sur des questions proches des axes de recherche de l'IGN et qui connaissent l'IGN.

Ces deux objectifs conduisent à proposer deux grandes parties :

- un aperçu des travaux effectués en 1995 ; il comporte des articles courts sans rappel de la problématique et du contexte; il présente principalement les actions pluriannuelles; c'est la partie C du bulletin,
- 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), n° 62 (bilan 1993) et n° 64 (bilan 1994) ou bien les publications dont les références sont à la fin de chaque article. Pour se procurer les bulletins ou d'autres publications, il est invité à se reporter à la partie D.

## Structure de la recherche à l'IGN

L'IGN est un établissement public de l'État à caractère administratif, placé sous la tutelle du Ministre de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme. Il a cinq grandes missions (décret du 12 mai 1981):

- exécuter et entretenir l'équipement géographique de la France : réseau de géodésie et de nivellement, couverture photographique aérienne, carte de base et cartes dérivées,
- numériser l'information géographique,
- éditer et gérer les documents correspondant aux activités précédemment citées : cartes, photos...
- former dans les disciplines de l'information géographique,
- effectuer les recherches d'intérêt général correspondants aux activités précédemment citées.

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

Le CST est constitué en majorité de représentants des Ministères intéressés par la recherche à l'IGN. L'expertise scientifique est assurée par quatre *groupes* de travail. Chaque groupe s'attache à une discipline particulière et comprend un représentant du CST, un membre de l'IGN et des scientifiques extérieurs à l'IGN.

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

La recherche est mise en oeuvre par les services de l'IGN. Les services de production (en particulier IGN-Espace à Toulouse) ont en charge certaines actions. L'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), grâce à son laboratoire de géodésie, joue un rôle important. Les trois autres laboratoires dépendent du *Service de la Recherche* (SR).

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

- Groupe 1 : Image et photogrammétrie    Laboratoire MATIS
- Groupe 2 : Instrumentation                    Laboratoire LOEMI
- Groupe 3 : SIG\* et Cartographie            Laboratoire COGIT  
(\* SIG = Système d'Information Géographique)
- Groupe 4 : Géodésie                            Laboratoire LAREG

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

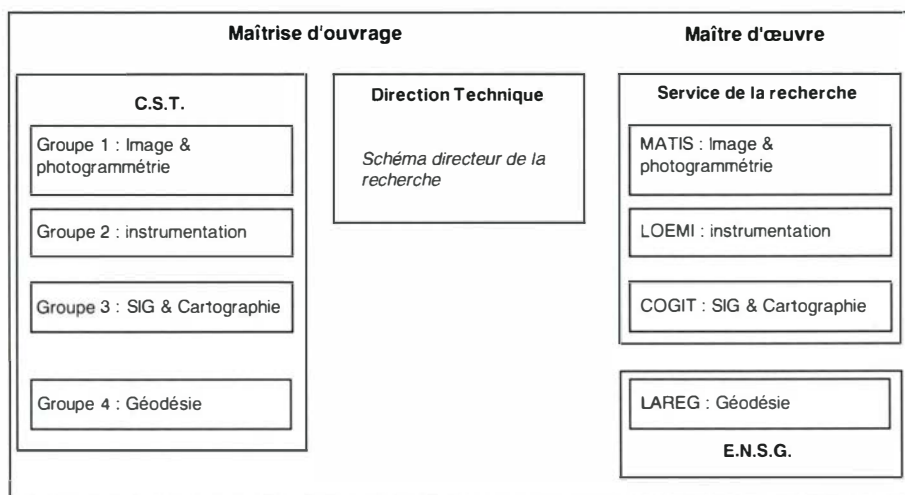


figure A.1 : organisation de la recherche à l'IGN

## Evolution des effectifs

Depuis 1994, les effectifs des laboratoires suivent une progression limitée par rapport aux années précédentes, en accord avec le schéma directeur de la recherche (cf. tableau A.2).

	<b>Effectifs au 1/1/94</b>	<b>Arrivées (Départs)</b>	<b>Effectifs au 1/1/95</b>	<b>Arrivées (Départs)</b>	<b>Effectifs au 1/1/96</b>
COGIT	12	2 (1)	13	6 (3)	16
MATIS	14	5 (3)	16	3 (2)	17
LOEMI	7	0	7	(1)	6
LAREG	11	0 (3)	8	4	12
<b>Total</b>	<b>44</b>	<b>7 (7)</b>	<b>44</b>	<b>13 (6)</b>	<b>51</b>

tableau A.2 : évolution des effectifs de recherche

## Répartition des moyens

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

§	Sujet	% du budget
/	Etude des mouvements tectoniques actuels par méthodes géodésiques	2,83 %
/	Geomix	0,48 %
/	SITAG	3,11 %
/	Qualification des données géographiques en vue d'une typologie des paysages	0,92 %
/	Références verticales	0,37 %
B.1.1	Étude préalable pour la mise à jour de l'occupation du sol BD Carto	1,76 %
B.2.1	Fabrication d'un prototype de caméra aérienne numérique	8,60 %
B.2.2	Prototype d'instrument aéroporté de télémétrie laser à champ large	3,40 %
B.2.3	Etude par simulation des possibilités métriques d'un capteur à balayage	1,07 %
B.3.1	Base de données multi échelles	2,23 %
B.3.2+C.3.7	Placement automatique des noms sur une carte	1,72 %
B.3.3+C.3.5	Généralisation automatique: approche à base de connaissances	3,99 %
B.4.1	Traitements DORIS	1,92 %
B.4.2+C.4.2	Géoïde	1,28 %
C.1.1	Lecture automatique de cartes	5,94 %
C.1.2	Conception et mise en oeuvre d'algorithmes pour la vision stéréoscopique	5,93 %
C.1.4	Applications semi automatiques d'aide à la restitution de la BD Topo	19,35 %
C.1.5	Apport des techniques d'extraction de crêtes sur MNT pour le calcul automatique d'un estompage	0,25 %
C.1.6	Evaluation de la qualité métrique d'une BD par la méthode du contrôle linéaire	2,37 %
C.2.1	Nouvelles technologies pour la télémétrie laser	1,40 %
C.2.2	Exploitation cartographique d'images radar	3,14 %
C.2.3	Emploi en métrologie de cartes GPS consommables	0,01 %
C.3.1	Modèles d'historique pour l'information géographique	2,85 %
C.3.2	Modélisation de la précision de localisation dans les BD géographiques	4,09 %
C.3.3	Généralisation cartographique algorithmique	1,92 %
C.3.4+C.3.6	Problèmes de modélisation liés à la généralisation	4,64 %
C.4.1	Systèmes de référence	3,97 %
C.4.3	Niveau des mers	1,48 %
C.4.4	Fonctionnement de l'IGS	5,77 %
C.4.5	Traitements GPS	3,21 %

*tableau A.3 : répartitions des moyens sur les actions*

## La vie de la recherche

### Projets Européens

L'IGN a participé au projet Amusing du programme Esprit, par une recherche sur les modèles de données et les algorithmes.

L'IGN participe au projet Genegis, du programme Eurêka. Genegis traite de l'information géographique dans le domaine des transports. Il vise à développer une plate-forme d'intégration d'informations géographiques de toute nature. L'IGN contribue comme fournisseur de données et comme expert sur les interfaces et plus particulièrement sur la généralisation cartographique.

L'IGN collabore avec Matra Cap Système au projet Geo2Dis du programme Esprit. La contribution de l'IGN s'appuie sur une compétence en système de gestion orienté-objet de données localisées, notamment à travers le prototype Géo2.

### Autres contrats

En collaboration avec le GIP-Reclus et O2 technologie, l'IGN a contribué à une maquette de démonstration de la gestion du temps et de l'espace, en s'appuyant sur l'expérience du prototype Géo2.

Avec le concours de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, l'IGN a mené une étude sur la vectorisation automatique des cartes.

L'IGN a porté et testé sur le système Mercator de Barco, l'outil de placement automatique de toponymes sur une carte.

## Congrès

Des chercheurs de l'IGN ont participé aux congrès suivants :

Titre	Lieu	Dates	
17ème conférence cartographique internationale	Barcelone	3/09	5/09
Autocarto 12	Charlotte(USA)	27/02	1/03
Conference on Spatial Information Theory (COSIT)	Vienne	21/09	23/09
Euro.Union GéoSciences	Strasbourg	9/04	13/04
Aerosense/SPIE	Orlando	19/04	21/04
Ascona	Ascona(I)	24/04	29/04
IERS	Paris	10/05	12/05
Journées BD-SIE	Versailles	12/06	15/06
Context-Based Vision (IEEE)	Cambridge-USA	19/06	23/06
DP & RS	St Petersburg	25/06	30/06
IUSM	Boulder (USA)	29/06	2/07
Union internationale de géodésie et géophysique	Boulder (USA)	2/07	14/07
5ème conférence internationale en traitement d'images et ses applications (IPA)	Edinburgh	3/07	6/07
3rd Symposium on large Spatial Databases	Portland	6/08	9/08
International Conference on Document Analysis and Recognition	Montréal	14/08	16/08
EurOpto	Paris	25/09	29/09
EuroConférence sur les SIG	Karlsruhe	11/09	13/09
Journées Cassini	Marseille	13/11	17/11
5th International Symposium on Land Subsidence	La Hague	16/10	20/10
ISPRS-WG.III (role of models in automated scene analysis)	Stockholm	30/08	1/09

*tableau A.4 : congrès*

## Chercheurs invités

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

- Nicholas Chrismann, Professeur à l'Université de Washington (Seattle-USA), du 1er janvier au 1er février,
- Robert Weibel, Professeur à l'Université de Zurich, du 28 mars au 24 avril,
- Michael Goodchild, directeur du National Center for Geographic information & Analysis (NCGIA), Professeur à l'Université de Californie, du 23 octobre au 3 novembre,
- Michela Spagnuolo de l'Istituto per la Matematica de Gènes du 26 au 30 octobre.

# **B. Quelques actions marquantes**

---

## **B.1.1 Approche d'une mise à jour automatique pour l'occupation du sol BDCarto à l'aide d'images SPOT.**

*par Cécile HUET et Mickael TONON*

### **Introduction**

L'actualisation des bases de données est aujourd'hui une des préoccupations à l'IGN. La saisie initiale de la BDCarto (base de données au 1 : 100 000) étant aujourd'hui achevée, l'établissement d'un processus de mise à jour doit être envisagé. Des tests, effectués à l'aide d'un processus existant, ont montré des résultats dont l'analyse est délicate. En effet, cette tentative de mise à jour met le doigt sur des problèmes relatifs au processus lui-même, mais également aux données et au contexte de la base de données. Le but de cet article est de décrire les tests mis en œuvre, d'analyser leurs résultats, et de proposer des solutions en vue de procéder prochainement à une mise à jour de qualité pour la BDCarto.

### **Contexte - objectifs**

La couche "Occupation du sol" (OCS) de la BDCarto, dont la saisie initiale sur images SPOT multispectrales a débuté en 1989 et est arrivée à terme en 1995, nécessite aujourd'hui l'établissement d'un protocole de mise à jour opérationnelle. Faisant suite à une étude préalable [CANTOU 94], une série de tests a été effectuée à IGN-Espace [TONON 95b] en collaboration avec le laboratoire MATIS et le SDT (Service des Cartes Dérivées et Thématiques) dont l'objectif était de comparer trois modes opératoires (modes manuels, semi-automatique et automatiques) d'actualisation de ces données.

L'échéance de mise à jour étant prévue pour être de quatre ans sur les zones très évolutives et huit pour le reste, la zone-test choisie couvrait une demi-feuille au 1 : 50 000 (15 km sur 20 km) au Nord-Ouest de Toulouse; c'est en effet une zone fortement évolutive, comprenant une grande diversité de paysages.

La saisie initiale de l'OCS -V1 (version 1) a été faite sur une image SPOT multispectrale de mai 1991, alors que la mise à jour est réalisée à partir d'une image SPOT XS datant de mai 1994. Cela permet de juger d'une évolution sur trois ans, là où les spécifications de contenu de la BDCarto préconisent une mise à jour tous les quatre ans sur de telles zones.

Afin de disposer d'une référence fiable pour juger de la qualité des mises à jour, une vérité-terrain 1994 a été réalisée au 1 : 25 000 sur la zone-test par photo-interprétation (photographies de 1992 et 1993) et visite sur le terrain, par le Centre Inter-Régional de Bordeaux.

Le jeu de données comprenait donc une interprétation SPOT 1991 (cf. figure B.1.1.5), l'image SPOT 1994 (cf. figure B.1.1.4), une interprétation SPOT 1994, et la vérité-terrain (cf. figure B.1.1.7)

Les cinq thèmes de la BDCarto (qui en comporte treize) présents sur la zone étaient :

- bâti,
- zone industrielle, commerciale ou de communication (ZIC),
- bois,
- hydrographie,
- prairie, cultures et autres.



Mais si les résultats apportés par le processus automatique furent encourageants, ils ne sont pas suffisamment positifs pour envisager aujourd'hui la mise en place d'un tel système en production.

L'objet de la présente étude est l'analyse des erreurs et carences liées au processus existant, en vue d'une amélioration, tant sur le plan conceptuel que technique, de ce dernier.

## Description du processus

On ne décrira pas ici le processus manuel qui ne fait pas l'objet de cette étude.

### Le processus automatique

Les deux phases principales de ce processus [LEMEN, JAMET 90] sont une *segmentation*, qui fournit une image de régions (ou zones homogènes) sur les données traitées, puis une *classification*, dont l'objet est l'interprétation automatique, par un algorithme approprié, des nouveaux thèmes de ces régions à l'aide de paramètres les caractérisant.

Les données initiales proviennent de l'interprétation manuelle sur l'image SPOT 1991; elles se présentent sous la forme de contours et thèmes de régions, selon les spécifications de la BDCarto.

*La segmentation.* L'algorithme le plus approprié aux régions de petit parcellaire (comme c'est le cas sur Toulouse) est la segmentation par détection de contours (algorithme des "bassins versants" puis "de montée des eaux") [BRETON 91], [GRENIER 94], [LE MEN, JAMET 90]. Cette segmentation, initialisée par les contours de l'interprétation 1991, utilise l'image du gradient de SPOT 1994 préalablement calculée par l'application d'un opérateur de détection de contours (Roberts, Deriche ...). On obtient ainsi une image sur-segmentée, où le seuil surfacique minimal est inférieur à celui des contraintes BDCarto, ce qui procure un support géométrique potentiel à toutes les évolutions. Chaque région est ensuite caractérisée par un jeu de paramètres calculés (radiométrie, texture, forme) ainsi que par son thème initial, qui servira de prototype lors de la phase d'entraînement de l'opération suivante : la classification.

*La classification.* Divers types d'algorithmes de classement peuvent être utilisés [LE MEN, JAMET 90], comme les nuées dynamiques ou la distance aux plus proches voisins (KNN). Ce dernier, qui fut utilisé, calcule pour une région donnée les  $k$  ( $k$  paramétrables), plus proches thèmes voisins (au sens radiométrique) dans l'espace des paramètres de zones. On obtient pour chaque région un vecteur d'appartenance floue dont les composantes ( $i$ ) sont les probabilités d'appartenir au ( $i$ ème) thème. Le thème finalement attribué à la région sera le thème le plus probable ("thème majoritaire").

NB: La classification automatique du processus ne prévoit pas ici d'opération de généralisation, consistant en la mise en cohérence des données avec les spécifications de la BDCarto (par seuillages surfaciques); les régions issues de la segmentation restent donc intactes.

Une possibilité existe, dans le mode automatique, de poser des conditions a priori sur les évolutions surfaciques de certains thèmes. Par exemple, dans une zone évolutive où l'on sait que l'urbain ne peut que croître, on peut imposer qu'une parcelle classée en bâti en 1991 ne change pas de thème en 1994; on nomme cette opération le "verrouillage".

### Processus semi-automatique

Un opérateur intervient à l'issue de ce classement pour saisir manuellement le nouveau thème de la parcelle si son indicateur de qualité est inférieur à un seuil fixé, sensé détecter les évolutions les moins probables.

Un autre mode semi-automatique de mise à jour des données BDCarto a également fait l'objet d'une étude dans un contexte externe [DUPLAQUET, CUBERO-CASTAN 94].

## Analyse des erreurs

### Analyse qualitative

Une comparaison visuelle entre la vérité-terrain (cf. figure B.1.1.7) et le résultat de la mise à jour automatique (cf. figure B.1.1.6) permet de dresser une typologie des erreurs observées, afin de mieux les interpréter.

Les différentes erreurs que l'on peut rencontrer dans une base de données cartographique peuvent être d'origine soit *géométrique* (effet de bords) soit *sémantique* (confusion au niveau descriptif). Ces confusions peuvent entraîner des omissions ou excédents de parcelles (erreurs d'*exhaustivité*), ou modifier la cohérence logique des objets entre eux (erreurs *topologiques*). NB : en raison de l'absence des autres couches topologiques (réseaux routiers et hydrographiques, objets ponctuels) on n'a pas recensé ici d'erreurs topologiques.

## Erreurs géométriques

Sont décrites comme géométriques les petites déformations aux frontières des régions.

Les contours de zones de la vérité-terrain et des données mises à jour ne présentent pas la même géométrie, ce qui se traduit (visuellement et non pas en nombre de pixels) par l'omission ou l'excédent quasi-systématique de petites parcelles aux frontières des agrégats (ou "paquets" de régions). Cette différence de positionnement des frontières pourrait être interprétée comme une évolution non détectée par la classification, mais une interprétation manuelle sur image SPOT 94, ne montrant rien de tel, met largement en doute cette hypothèse.

En définitive, ces erreurs ne doivent pas être considérées comme telles, car elles montrent simplement la différence de niveaux de détail acceptés dans chacun des jeux de données : la vérité-terrain, saisie sur photos aériennes, n'est, volontairement, pas généralisée. Ce défaut de généralisation est pris en compte, il est vrai, dans le processus d'évaluation chiffrée, mais ce phénomène n'est pas sans évoquer les différences de représentations thématiques que peuvent induire les interprétations du terrain. En effet, si le terrain réel est unique, la vérité-terrain n'en est qu'une représentation filtrée à travers une interprétation souvent discutable, appelée "terrain nominal" [LE MEN, JAMET 93]. Quel niveau de généralisation donner à cette représentation, sachant qu'elle doit être comparable avec les données testées, sans toutefois perdre une certaine exhaustivité de l'information ?

## Erreurs d'exhaustivité

Le principal type d'erreurs d'exhaustivité générées ici par la classification est l'omission : omission de petites (voire très petites) parcelles d'une part, quel que soit leur thème, isolées dans un voisinage homogène, mais également de régions de plus grande taille, appartenant à des thèmes peu représentés sur l'ensemble de la zone (vigne/verger, carrières).

*Influence du seuil surfacique de la segmentation* : le principal facteur d'omission de petites surfaces est la valeur du seuil de surface minimale choisi lors de la segmentation. Des tests ont montré [LE MEN, JAMET 94] que les erreurs d'omissions connaissent en moyenne un minima pour un seuil surfacique de 30 pixels et qu'elles croissent très faiblement pour des valeurs s'en éloignant. Le seuil employé sur Toulouse était de 20 pixels, mais ceci n'explique pas l'omission de certaines régions de taille supérieure à 20, phénomène que l'on attribuerait plutôt à une confusion radiométrique. De toute façon, le seuil surfacique de la BDCarto étant supérieur à 20 pixels, une partie de ces erreurs serait absorbée par un processus simple de généralisation; une autre partie, concernée par certaines opérations de généralisation plus complexes (id. destruction/partage, jonction) resterait toutefois présente et se doit d'être réduite.

*Influence du nombre de prototypes* : certaines erreurs d'omission peuvent s'expliquer par la faible représentativité sur l'ensemble de la zone du thème auquel ils appartiennent (carrières, bois, vigne/verger). En effet, un nombre trop restreint de prototypes (qui sont les états initiaux de chaque parcelle) sur un thème donné rend parfois difficile l'identification du thème vrai parmi les thèmes majoritaires (la radiométrie de la zone en question ne figurant pas dans les k plus proches voisines, la région est classée "autres" en thème majoritaire). Le bois présentant une radiométrie variable selon sa texture ou sa maturité, certaines omissions le concernant peuvent également être imputées à un choix de paramètres non suffisamment précis.

## Erreurs sémantiques

*Confusions entre thèmes* : Les erreurs du niveau sémantique se caractérisent par une confusion d'attribut sur une parcelle reconnue. Elles peuvent être quantifiées sous la forme de matrices de confusion entre thèmes majoritaires des régions appariées (cf. § Analyse quantitative des erreurs). Qualitativement, on observe sur la zone de Toulouse de fréquentes confusions entre les thèmes "bâti" et "ZIC", ce qui n'a rien d'étonnant vu leur radiométries variables, difficilement différenciables de par leur texture hétérogène. Ces types de classes sont, de plus, souvent voisines, voire mêlées, ce qui ne facilite pas leur détection. Il est donc nécessaire de trouver des paramètres les discriminant au mieux.

*Confusion d'interprétation, cas de l'aéroport* : on peut constater (cf. figure B.1.1.6) que la mise à jour automatique n'a respecté en rien les structures géométriques et la sémantique de l'aéroport de Blagnac (disparition du thème ZIC, apparition non cohérente des thèmes "bâti" et "prairie, autres"). Cette confusion provient d'une interprétation de l'aéroport orientée vers un usage du sol plutôt que vers une occupation du sol : les prairies de l'aéroport sont interprétées en ZIC alors que radiométriquement elles s'apparentent au thème "autres". L'entraînement est donc biaisé et ce décalage génère des confusions lors du classement KNN. Ce type d'erreur est difficilement rattrapable en tout-automatique dans la mesure où il n'existe pas de classe "aéroport". Cet exemple montre un des problèmes majeurs de ce type de processus : afin de mettre à jour la BDCarto, on cherche non pas à exploiter tout ce que l'imagerie SPOT nous offre, mais à "reconnaître" les différents thèmes de la BDCarto dans ces images; cependant l'ensemble des postes BDCarto ne recouvre pas l'ensemble des classes radiométriques de SPOT.

## Analyse quantitative des erreurs

Un processus d'évaluation de la qualité des résultats a été développé au laboratoire MATIS [LE MEN, JAMET 93]. Son utilisation permet de quantifier ici, par comparaison des différents de jeux de données (interprétation initiale, données issues de la mise à jour, vérité-terrain et interprétation 1994), la qualité des différents processus entre eux [TONON 95a].

### Les résultats globaux

On pourrait se faire une idée du type d'évolutions rencontrées sur Toulouse en comparant la vérité-terrain et l'interprétation de 1991. Mais si l'on détecte de la sorte quelques changements réalistes ("prairie, autres" vers "bâti", "bois" vers "prairie, autres") —en considérant la vérité-terrain comme exacte (cf. § Analyse qualitative), certaines évolutions paraissent en revanche douteuses (ZIC vers bâti), voire fictives (bâti vers bois), et, de toutes les façons, sont plus ou moins masquées par la variabilité de l'interprétation cartographique. En effet, plusieurs interprétations (manuelles ou automatiques) effectuées dans un contexte externe ont montré que la variabilité d'interprétation d'un processus est d'environ 10 % [TONON 95a]. Or, une comparaison entre l'interprétation de 1991 et les données mises à jour font figurer une évolution réelle d'environ 6 % (cette zone-test est pourtant plus évolutive que la moyenne nationale). Les résultats quantitatifs obtenus lors de l'évaluation ne sont donc guère significatifs; on admettra qu'ils évoquent des tendances globales.

Tout en émettant certaines réserves sur la pertinence des résultats, on peut constater que le processus semi-automatique donne des résultats comparables à ceux d'une mise à jour manuelle (76 % de surface reconnue pour le processus semi-automatique contre 76,6 % pour le processus manuel).

Le processus semi-automatique réalise une meilleure identification que la saisie initiale (76 % contre seulement 70,9 %). La saisie initiale comparée à la référence terrain 1994 nous renseigne sur l'option "pas de mise à jour" : c'est l'indice de non-qualité, qui doit se dégrader avec le temps.

La classification seule ("tout-automatique") donne des résultats plus mauvais que ceux de la saisie initiale (69,2 % de surface reconnue contre 70,9 % initialement) : le responsable est sans doute la sur-segmentation qui a fait apparaître beaucoup de petites parcelles qui sont mal identifiées.

Les tests sur le processus semi-automatique ont montré que sur la zone-test, la saisie de 15 % des parcelles après la classification était un bon compromis entre la qualité finale et le temps opérateur passé. De même, l'utilisation du verrouillage, qui empêche certains thèmes de décroître en surface, a amélioré la qualité finale pour les deux thèmes les plus évolutifs (bâti, zones industrielles).

### Analyse thématique

Les différents types d'erreurs générées par le processus automatique sont quantifiés à l'aide de matrices de confusions entre thèmes majoritaires des régions appariées. Le tableau ci-dessous (cf. figure B.1.1.1) montre, sur la région de Toulouse, les confusions (en nombre de pixels) détectées entre les différents thèmes présents. En abscisse figurent les thèmes du résultat de la mise à jour, en ordonnée ceux de la référence (vérité-terrain).

Le thème "broussailles" n'étant pas répertorié dans la légende BDCarto, celles de la vérité-terrain ont été reclassées. Les thèmes "vigne/verger" et "carrières" ont été omis lors du processus automatique (cf. § Analyse qualitative).

Thèmes	bâti	ZIC	carrières	prairie /cult.	vigne /verger	bois	broussailles	hydro
<b>bâti</b>	174682	3994	0	20606	0	1085	0	269
<b>ZIC</b>	8633	44702	0	9792	0	245	0	47
<b>carrières</b>	357	260	0	2130	0	71	0	137
<b>prairie/cult.</b>	12040	1797	0	359897	0	3415	0	193
<b>vigne/verger</b>	14	0	0	1929	0	72	0	42
<b>bois</b>	603	334	0	14191	0	30228	0	222
<b>broussailles</b>	610	185	0	1299	0	198	0	20
<b>hydro</b>	452	803	0	2132	0	629	0	15042

**tableau B.1.1.1** : matrice de confusion entre thèmes (en nombre de pixels). Comparaison entre le référence (verticalement) et les données issues du processus de mise à jour (horizontalement).

Généralement, le thème "zones industrielles, commerciales et de communication" (thème n° 2) est le moins bien identifié. Il est en effet assez hétérogène (il peut comprendre aussi bien des usines, des routes, des parkings que certains terrains vagues). La mise à jour semi-automatique permet cependant de faire passer le pourcentage (surfacique) de reconnaissance de 75,7 % (pour la saisie initiale) à 84 %. Inversement, un nombre important de parcelles prennent à tort le thème n° 2, notamment des parcelles classés auparavant en prairie. Cette confusion est renforcée par le flou des spécifications BDCarto à propos des aéroports (cf. § Analyse qualitative).

Le bâti se distingue un peu mieux que les zones industrielles, car il est un peu plus homogène (passage de 80,9 à 85,1 %). En revanche, la forêt n'est pas aussi bien discriminée que l'on pourrait s'y attendre (passage de 81,3 % à seulement 83 %) : ainsi, la forêt est moins bien reconnue que les zones industrielles et le bâti alors que c'est un thème homogène, généralement bien détecté par classification.

Le tout-automatique, quant à lui, améliore un peu la détection du bâti (qu'il confond un peu avec les zones industrielles), mais se montre inférieur à la saisie initiale pour les autres thèmes. La forêt est particulièrement mal détectée (66,3 % de reconnaissance contre 81,3 % en saisie initiale) : elle a été largement confondue avec la prairie, phénomène probablement amplifié par le manque de généralisation. Pour le thème "zones industrielles et de communication", le tout-automatique reconnaît moins mais "invente" moins, ce qui signifie que l'opérateur, s'il a fait progresser le taux de reconnaissance du thème, a introduit également beaucoup d'erreurs en même temps (taux de fiabilité inférieur), ce qui n'est pas le cas des autres thèmes. Cela est dû certainement au flou sur les aéroports : le tout-automatique a dû bien reconnaître les infrastructures (qui sont clairement dans ce thème) sans mettre dedans les zones plus douteuses de pelouses : pour ces parties là, l'opérateur de mise à jour et l'opérateur de la vérité-terrain divergent un peu d'opinion et donc introduisent une erreur supplémentaire (qui a raison? On retrouve le problème de l'unicité du terrain nominal).

## Apport de solutions

Regroupons les différents types d'erreurs décelées à l'issue de ces tests:

- Le plus gros problème rencontré lors d'un tel processus est la variabilité de l'interprétation, qui rend périlleuse l'évaluation de la qualité finale : pour y remédier, il serait nécessaire de procéder à des tests de mise à jour sur une zone dont l'évolution serait proche de (ou supérieure à) 10 % : avec 2 % de croissance par an, il serait intéressant de disposer d'un intervalle d'au moins 6 ans.

- Le problème des confusions de thèmes au niveau de la classification peut être minimisé si l'on verrouille le thème, mais il faut dans ce cas pouvoir émettre l'hypothèse que ce thème n'évoluera pas (possible pour les carrières, pas pour les bois). Si la cause en est le manque de prototypes, on pourrait envisager l'utilisation de zones d'entraînement plus diversifiées. Enfin, la recherche de paramètres de zones (en texture notamment) pourrait permettre d'améliorer la qualité de la différenciation des thèmes entre eux (comme "bâti" et "ZIC"). On note cependant que, dans le cas d'un processus de mise à jour, il ne s'agit pas de différencier les thèmes "bâti" et "ZIC", mais de détecter leurs évolutions : les probabilités qu'ils évoluent l'un vers l'autre sont faibles, et si l'on introduisait la valeurs de ces probabilités dans le processus, on gagnerait probablement de la qualité *in fine* (il en va de même pour l'évolution "ZIC" vers "prairie, cultures", que la classification détecte abondamment sur l'aéroport alors que sa probabilité est quasiment nulle). Cette notion, développée plus loin, pourrait être intégrée dans le processus de classification.

- Le problème du manque de généralisation doit enfin être résolu, tout en faisant disparaître un minimum d'informations concernant les évolutions (cf. § Généraliser).

## Contraire les évolutions

On ressent bien le besoin d'introduire dans la mise à jour des contraintes portant sur une connaissance des évolutions, afin de stabiliser au maximum les choix initiaux d'interprétation. L'idée est donc de procéder à un classement probabiliste conditionnel (bayésien), basé sur une connaissance des changements a priori (sous la forme de probabilités de transition).

L'obtention des probabilités de transitions a priori se fait à partir des données TER-UTI (estimations du Ministère de l'agriculture sur l'ensemble du territoire pour l'usage du sol). Après une mise en correspondance des légendes BDCarto et TER-UTI, on obtient une matrice de transition a priori. La figure B.1.1.2 montre la matrice des évolutions entre 1982 et 1992. Chaque ligne contient la probabilité d'évolution, pour une OCS de 1982, d'un thème vers les autres. Ex: La probabilité d'évolution du thème "bâti" vers le thème "prairie, culture" est de 0,64 %.

NB : Afin de rendre plus significatifs les composantes de cette matrice de transition et de prendre en compte les effets "réducteurs" de la généralisation, il sera sans doute nécessaire d'affaiblir les faibles probabilités et de renforcer les fortes.



THEMES BDCarto	marais salants	hydro	marais	glacier	roche	plage	bois	culture & vigne	vigne & culture	lande	ZIC	carrières	bâti
<b>Marais salants</b>	<b>.9272</b>	.0136	.0504	.0000	.0000	.0000	.0000	.0033	.0000	.0011	.0011	.0011	.0022
<b>Hydrographie</b>	.0014	<b>.9312</b>	.0123	.0000	.0012	.0003	.0125	.0283	.0007	.0041	.0038	.0032	.0009
<b>Marais</b>	.0044	.0321	<b>.7699</b>	.0000	.0000	.0000	.0400	<b>.1152</b>	.0006	.0222	.0063	.0025	.0069
<b>Glacier</b>	.0000	.0000	.0018	<b>.9599</b>	.0328	.0000	.0000	.0055	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
<b>Rocher</b>	.0000	.0022	.0001	.0005	<b>.9393</b>	.0001	.0175	.0153	.0000	.0230	.0013	.0006	.0001
<b>Plage</b>	.0033	.1130	.0177	.0000	.0101	<b>.7533</b>	.0239	.0480	.0000	.0034	.0137	.0101	.0035
<b>Bois</b>	.0000	.0010	.0003	.0000	.0006	.0000	<b>.9603</b>	.0226	.0010	.0091	.0025	.0008	.0017
<b>Cultures &amp; prairie</b>	.0000	.0014	.0006	.0000	.0005	.0000	.0101	<b>.9601</b>	.0056	.0093	.0053	.0007	.0064
<b>Vigne &amp; vergers</b>	.0000	.0007	.0001	.0000	.0001	.0000	.0058	<b>.1832</b>	<b>.7868</b>	.0087	.0053	.0010	.0084
<b>Lande</b>	.0002	.0018	.0024	.0000	.0093	.0001	<b>.1303</b>	<b>.1248</b>	.0051	<b>.7092</b>	.0082	.0024	.0061
<b>ZIC</b>	.0002	.0032	.0001	.0000	.0003	.0000	.0150	.0796	.0084	.0076	<b>.8628</b>	.0023	.0204
<b>Carrières</b>	.0000	.0321	.0000	.0000	.0048	.0008	.0366	<b>.1197</b>	.0024	.0382	.0534	<b>.6700</b>	.0421
<b>Bâti</b>	.0000	.0018	.0000	.0000	.0001	.0000	.0090	.0748	.0026	.0076	.0378	.0026	<b>.8637</b>

*tableau B.1.1.2 : matrice des probabilités de transition pour les thèmes BDCarto V1 sur l'ensemble de la France.  
(sources : TER-UTI, Ministère de l'agriculture)*

## Généraliser

Les évolutions, une fois détectées, doivent être cartographiées selon les normes des spécifications BDCarto (seuillage surfacique pour chacun des thèmes). Mais, le seuil surfacique de la segmentation étant inférieur à celui de la généralisation, le risque, pour des évolutions minoritaires, est de voir ces dernières disparaître au terme de la généralisation. Il faut donc procéder à une généralisation "intelligente" (adaptée au contexte), et cela avant la détermination du choix final du thème majoritaire, ce qui permet de conserver un maximum de degré de liberté jusqu'à la fin du processus de mise à jour.

Les 5 opérations de généralisation de surfaces sont : la fusion, l'agglomération, la dilatation, la jonction et la destruction/partage (dans notre cas on exclut la jonction car on juge la géométrie issue de la sur-segmentation suffisamment pertinente), et elles devront être effectuées alors que le thème des parcelles est encore sous forme probabiliste, c'est à dire sous la forme de vecteur d'appartenance floue. Ainsi, en fin de traitement, toute région conservée sera supérieure (en surface) au seuil de son thème le plus probable.

## Implémentation

La figure B.1.1.3 montre l'organigramme du nouveau processus de mise à jour proposé. L'enchaînement des traitements est peu différent du processus initial, et les améliorations prévues sont essentiellement du domaine algorithmique.

Enfin, un apport simple mais non négligeable est l'augmentation de la marge temporelle (plus de 5 ans) entre les 2 jeux de données, laquelle, on l'espère, aura occasionné des changements plus nets.



## Alternative : la différence d'images

Le problème de la détection des changements peut également être envisagé sous un autre angle : une soustraction d'images SPOT pixel à pixel entre les 2 époques considérées pourrait théoriquement faire apparaître cette notion. Cette démarche aurait un double avantage : obtenir, d'une part, une image des données stables permettant d'effectuer un entraînement non bruité par les évolutions, et d'autre part une image des évolutions seules, concernées par la classification.

Mais en pratique cette manipulation de bas niveau est à effectuer non sans certaines précautions. Plusieurs problèmes peuvent en effet apparaître : des effets d'ombre plus ou moins importants induiraient des différences radiométriques non négligeables ne correspondant pas à la réalité ; des régions homologues (i.e. une région sur les 2 images) pourraient afficher des radiométries très différentes sans pour autant changer de classe thématique (ex: un champ de tournesol n'a pas la même radiométrie qu'un champ de blé, du blé en herbe n'a pas la même radiométrie que du blé mûr, mais tous appartiennent à la classe "cultures").

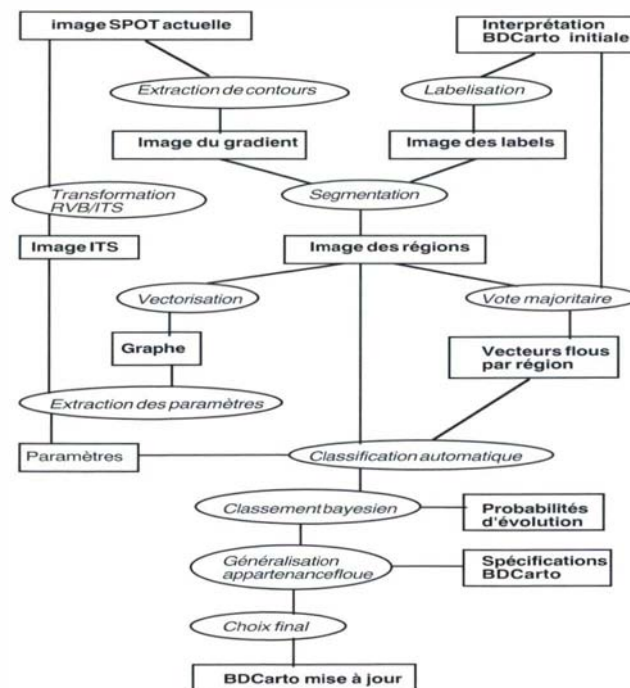
Pour limiter les effets d'ombre, il est nécessaire de procéder à des corrections radiométriques (ou calibration absolue), et principalement en présence de relief ou de surfaces hydrographiques. Une exactitude temporelle entre les 2 scènes comparées aurait pour effet de limiter les différences radiométriques à l'intérieur d'une même classe, à condition toutefois que les images soient prises au printemps, époque où la plupart des cultures sont à l'état de semis. Enfin, certains paramètres ne peuvent être évités, comme les conditions météorologiques, les mises en serre...Etc.

En supposant la soustraction d'images concluante, on peut envisager l'utilisation d'une classification sur les données SPOT finales en ne retenant que les changements détectés. Cependant, devant l'incertitude de son succès, cette démarche sera envisagée de manière indépendante.

## Conclusion

Faisant suite à cette étude, des tests vont être conduits cette année, sur plusieurs jeux de données, afin d'apporter à cette proposition conceptuelle et technique les conclusions qu'il se doit. Ces nouveaux tests seront effectués au MATIS, sur une région rurale et boisée (Vosges) et une région mixte à forte évolution (ville nouvelle en région parisienne) entre une image SPOT 96 et des données initiales de 90/91. Les principales améliorations envisagées se situent en fin de traitement, mais des petits apports seront également testés sur les outils initiaux (recherche de paramètres plus discriminants, recherche d'une modélisation radiométrique pour le classement plus adéquate au type de données (autre que KNN),...). L'échéancier prévoyant une phase de mise en place opérationnelle du processus, l'exécution des tests puis l'évaluation des résultats obtenus, les premières conclusions pourront être fournies aux environs de fin 1996.

Grâce aux améliorations proposées, on peut espérer obtenir sur ce processus de mise à jour automatique une incertitude inférieure à 10 %; d'autre part, l'écart temporel se creusant depuis 1990, le pourcentage d'évolution devrait excéder les 6 %, ce qui laisse entrevoir pour les prochains tests une évaluation plus pertinente. Quoiqu'il en soit, la principale conclusion fournie par cette étude est que la mise à jour de la BDCarto doit, certes, être envisagée, mais que sa concrétisation n'est pas nécessaire avant 1997.



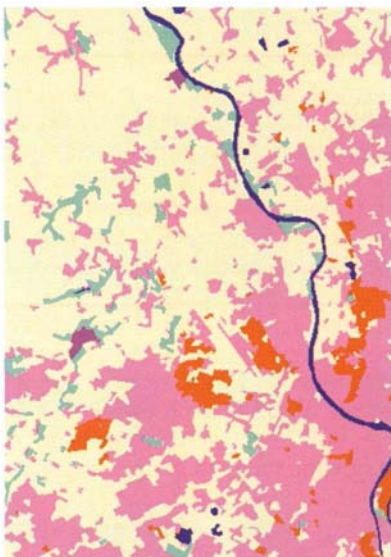
**figure B.1.1.3** : organigramme du processus de mise à jour automatique  
(les principales améliorations concernent les 3 dernières étapes du schéma)



**figure B.1.1.4** : image SPOT XS (1994) sur Toulouse



**figure B.1.1.5** : interprétation BDCarto initiale (1991)



**figure B.1.1.6** : données BDCarto issues du processus de mise à jour (1994)



**figure B.1.1.7** : vérité-terrain (1993)

## Références

- [BRETON 91] BRETON E., *Segmentation multi-date par parcelles*, projet pluridisciplinaire IT2, Septembre 1991.
- [CANTOU 94] CANTOU J.P., *Etude technique préalable sur la mise à jour de l'OCS BDCarto*, IGN Espace, Octobre 1994.
- [DUPLAQUET, CUBERO-CASTAN] DUPLAQUET M.L., CUBERO-CASTAN E., *Updating cartographic models by SPOT images interpretation*, Image and Signal Processing for Remote Sensing, Septembre 1994.
- [GRENIER 94] GRENIER F., *Interprétation assistée pour l'occupation du sol*, mémoire de DDA, Octobre 1994.
- [JAMET, BIANCHIN 90] JAMET O., BIANCHIN A., *Measuring the accuracy of the land-use content of a GIS*, Proc. EUROCATO 8, April 1990.
- [LEMEN, JAMET 90] LEMEN H., JAMET O., *Interprétation automatique de l'occupation du sol sur image SPOT*, symposium ACI, Cartographie dérivée des images satellitaires, Saint-Mandé, Octobre 1990.
- [LEMEN, JAMET 93] LEMEN H., JAMET O., *Qualité de processus d'interprétation et qualité des résultats : un exemple en cartographie d'occupation du sol*, Symposium ACI, Cartographie dérivée des images satellitaires, Tunis, Décembre 1993 (A paraître bulletin du CFC).
- [LEMEN, JAMET 94] LEMEN H., JAMET O., *Mesure de qualité d'interprétations d'images SPOT pour l'occupation du sol*, SFPT-RSS, Septembre 1994.
- [TONON 95a] TONON M., *Tests de mise à jour de l'occupation du sol BDCarto*, rapport UFSI-Analyste, IGN Espace, Mai 1995.
- [TONON 95b] TONON M., *Processus semi-automatique de mise à jour de l'OCS BDCarto*, Ebauche de définition détaillée, rapport technique, IGN-Espace, Mai 1995.

## B.1.2 Appariement stéréoscopique d'images aériennes et extraction du sursol en milieu péri-urbain

par Caroline Baillard

### Introduction

Un des principaux domaines de recherche en photogrammétrie numérique est la mise en correspondance d'images stéréoscopiques qui, associée à la connaissance du modèle d'acquisition, permet de reconstruire la surface 3D de la scène. L'étape d'appariement, qui consiste à identifier les points homologues dans les 2 images, constitue le point-clé de la stéréorestitution, mais représente un problème difficile qui n'a pas encore trouvé de solution générale. L'IGN s'intéresse tout particulièrement à cette problématique dans un contexte spécifique d'images aériennes à moyenne échelle, pour restituer l'ensemble des thèmes cartographiques traditionnels avec une précision de l'ordre du mètre selon les 3 directions (constitution de la BDTOP). L'automatisation de la mise en correspondance constitue ainsi l'un de ses axes de recherche. L'étude présentée a débuté au MATIS fin 1994 dans le cadre d'une thèse en collaboration avec l'ENST (direction Henri Maître) et porte sur le cas particulier des milieux péri-urbains. Dans ce cadre, nous proposons un algorithme de mise en correspondance stéréoscopique adapté aux difficultés rencontrées, ainsi qu'une méthode pour extraire le sursol.

### Contexte et objectifs

Le milieu péri-urbain constitue un contexte délicat car il réunit à lui seul des thèmes variés (bâtiments, routes, zones boisées, parcs, etc...), dont le comportement stéréoscopique est spécifique à chacun d'eux : non seulement les réponses aux algorithmes de mise en correspondance varient d'un thème à l'autre, mais de plus il n'est pas possible de définir un modèle d'altitude unique sur l'ensemble de la scène sans connaître la nature du sursol (pour la phase d'interpolation par exemple). Il semble donc important de disposer d'une interprétation partielle des images. En ce sens, l'analyse monoscopique (reconnaissance de formes, analyse texturale...) peut aider à la restitution tridimensionnelle. Réciproquement, la connaissance de l'altitude locale est un élément remarquable du processus d'interprétation de la scène. L'idée que nous avons adoptée est donc de faire coopérer démarches monoscopiques et stéréoscopiques, pour obtenir en sortie de traitement une restitution altimétrique précise de la scène, ainsi qu'une interprétation partielle de celle-ci.

Cette année, on a plus particulièrement abordé le problème de l'établissement d'une image initiale de disparités (parallaxes), servant de point de départ à ce processus. Le rôle de cette image est d'aider à la classification de l'image de référence. On ne cherche pas encore à cette étape à reconnaître de façon fiable les objets, ni à les caractériser précisément d'un point de vue planimétrique ou altimétrique. On veut par contre pouvoir extraire les régions de sursol avec un maximum d'exhaustivité, en évitant de détecter des zones parasites. Nous avons donc besoin d'une restitution dense, peu bruitée, et préservant les discontinuités de la scène. Enfin, la mise en correspondance, précédant l'interprétation proprement dite, doit s'opérer à bas niveau; les primitives utilisées seront donc simples, et le temps de calcul relativement réduit.

Les données d'entrée sont des couples de vues aériennes numérisées en 256 niveaux de gris, de résolution planimétrique de 25 à 75 cm/pixel. L'angle d'observation est quasi vertical, et un écart de disparité de 1 pixel correspond à un écart altimétrique variant de 0,5 à 1m. L'intervalle de temps entre les prises de vues étant de quelques secondes, les changements radiométriques de la scène ne sont dus qu'aux objets mobiles lors de l'acquisition. Les images telles que nous les traitons sont rectifiées en géométrie épipolaire lors de la production IGN. La précision de l'orientation initiale est de l'ordre de 1/10 pixel [GUIAVARC'H 94].

### Approche proposée pour la mise en correspondance

Pour résoudre le problème de la mise en correspondance stéréoscopique, de nombreuses approches ont été explorées, pouvant schématiquement être regroupées en deux classes : les approches photométriques et les approches géométriques. Dans le premier type de méthodes, l'image est appréhendée comme un signal d'intensité et directement traitée comme telle ; les disparités obtenues possèdent l'avantage d'être denses. Cependant, la gestion des discontinuités et des occlusions s'y fait souvent au détriment de la simplicité du traitement, ce qui va à l'encontre de nos contraintes. Une façon de réduire la complexité du traitement est de faire précéder l'appariement photométrique d'une étape de mise en correspondance géométrique. Dans ce deuxième type d'approche, les images sont préalablement interprétées en termes de primitives à appairier ; les caractéristiques de la scène sont alors mieux préservées. Nous proposons donc une approche mixte en deux étapes qui bénéficie des avantages des deux approches [BAILLARD 96].

Une première étape consiste à appairier les points de contour des deux images. On a choisi ces primitives car elles correspondent souvent à des discontinuités physiques de la scène et sont généralement présentes sur l'ensemble de l'image. Les points de contour appariés définissent alors des couples d'intervalles, qui sont eux-mêmes mis en correspondance. Ainsi, les points de contour 3D limitent les faux appariements par une réduction de l'espace de recherche. On adopte donc une stratégie hiérarchique en deux étapes (un premier résultat guide l'autre) bien adaptée au contexte des milieux péri-urbains. La démarche générale adoptée est illustrée par le schéma page suivante.



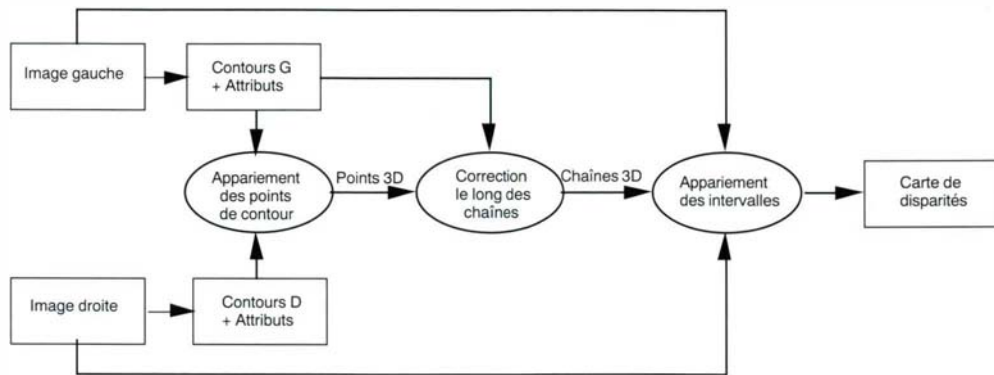


figure B.1.2.1 : processus de mise en correspondance

### Appariement des points de contour

Les points de contour sont obtenus par application du filtre de Canny-Deriche [DERICHE 87], suivie d'un seuillage par hysteresis. Ils sont alors mis en correspondance par programmation dynamique, par couples de lignes épipolaires conjuguées. La démarche s'inspire des travaux de T. Dang [DANG 94]. Un critère de cohérence intra-chaîne permet d'assurer la cohérence inter-ligne des appariements.

Pour chaque plan épipolaire, les points de contour des images droite et gauche sont ordonnés par ordre d'apparition le long des lignes épipolaires conjuguées, et définissent ainsi un système de coordonnées dans lequel on cherche un chemin de coût minimal. Dans le cas particulier d'éléments de contour parallèles à la ligne épipolaire, seul le milieu est conservé dans le graphe. On part d'un couple initial  $(G_0, D_0)$  correspondant à un contour 3D fictif (choisi en fonction du recouvrement des deux images, et commun à toutes les lignes). Pour arriver à l'autre extrémité du tableau (dernière colonne ou dernière ligne, dans la limite du domaine de disparité). Pour déterminer le chemin de coût minimal, on procède de façon récursive : le coût partiel  $C(i, j)$ , coût du chemin reliant le point  $(G_0, D_0)$  au point  $(G_i, D_j)$ , est calculé à partir des coûts partiels  $C(i-1, j-1)$ ,  $C(i-1, j)$  et  $C(i, j-1)$ , selon la configuration suivante :

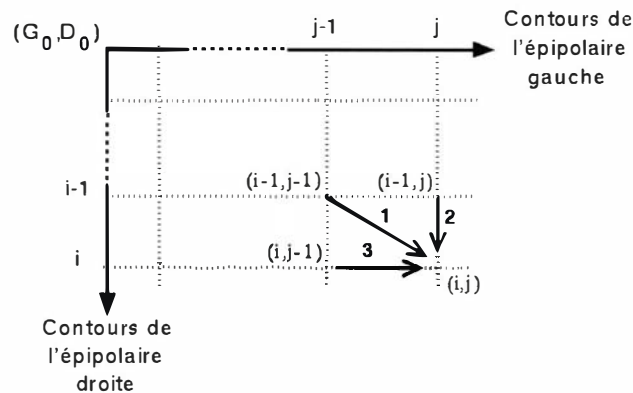


figure B.1.2.2 : configuration pour l'appariement des points de contour

Un chemin passant par  $(G_i, D_j)$  emprunte donc nécessairement l'un des chemins élémentaires 1, 2 ou 3 de la figure B.1.2.2. Le chemin élémentaire 1 représente l'appariement des pixels de contour  $i$  et  $j$ , et est associé à un coût d'appariement  $app(i, j)$ . Les chemins élémentaires 2 et 3 correspondent respectivement à l'occlusion du pixel  $i$  de l'image droite, et celle du pixel  $j$  de l'image gauche ; le coût  $occ$  relatif à ces derniers est appelé coût d'occlusion. Le coût partiel en  $(i, j)$  est alors défini par la relation suivante :

$$C(i, j) = \min( C(i-1, j-1) + app(i, j), C(i-1, j) + occ, C(i, j-1) + occ )$$

Le point délicat de l'appariement par programmation dynamique réside dans le choix de la fonction de coût et dans le maintien de la cohérence inter-ligne.

Le coût d'occlusion est actuellement fixé, et le choix de sa valeur numérique traduit la remarque suivante: l'appariement des pixels  $i$  et  $j$  est préférable à l'occlusion de  $i$  et de  $j$  si  $app(i, j) < 2 \cdot occ$ . Le coût d'occlusion sert alors de seuil maximal pour le coût d'appariement.

Le coût d'appariement résulte d'une étude statistique préalable concernant l'ensemble des appariements potentiels, et prend ainsi implicitement en compte la cohérence inter-ligne. On définit pour cela le coût local d'appariement  $app0(i,j)$ , qui mesure la similarité des points de contour  $i$  et  $j$  :

$$app0(i,j) = \alpha.\Delta q + \beta.\Delta G + \gamma.\min(\Delta ngg, \Delta ngd)$$

où  $\Delta q$  est la différence d'orientation du gradient d'intensité en  $i$  et en  $j$ ,  $\Delta G$  la différence des modules du gradient, et  $\Delta ngg$  (resp.  $\Delta ngd$ ) celle des niveaux de gris moyens à gauche (resp. à droite) des pixels  $i$  et  $j$ .

Les chaînes de contours de l'image gauche sont par ailleurs polygonalisées. Pour chaque portion de chaîne, on s'intéresse aux groupes d'appariements "cohérents" (définis comme produisant des disparités voisines). Plus un groupe est important, plus ses éléments voient leur coût individuel d'appariement  $app(i,j)$  réduit. La mise en correspondance tient alors compte de la cohérence des disparités sur chaque portion de chaîne.

Malgré l'introduction d'une contrainte de cohérence dans la fonction de coût, quelques erreurs locales d'appariement subsistent, d'où la nécessité d'une correction a posteriori. On utilise la contrainte stipulant que la disparité varie linéairement le long de contours linéaires [MOHAN et al 89]. Cette remarque justifie par ailleurs notre choix de voisinage (portions linéaires) pour déterminer les coûts d'appariement. Nous corrigeons donc par moindres carrés les disparités obtenues, selon un modèle linéaire appliqué à chacune des portions définies précédemment. Cette opération permet à la fois de corriger les erreurs ponctuelles, et de compléter des portions de chaînes partiellement indéterminées.

### Appariement photométrique entre points de contour

L'appariement est également réalisé par programmation dynamique. La configuration utilisée pour l'appariement des intervalles est la même que pour l'appariement des points de contour. Les extrémités du chemin correspondent aux extrémités de l'intervalle considéré et leurs homologues respectifs. Le coût d'appariement entre deux pixels  $i$  et  $j$  est défini par :

$$app(i,j) = 1 - cor(i,j,N),$$

où  $cor(i,j,N)$  est le coefficient de corrélation calculé sur des fenêtres de taille  $N$  sur  $N$  (fixée), centrées sur les pixels  $i$  et  $j$  des images droite et gauche. Notons que la cohérence inter-ligne est alors implicitement prise en compte dans la détermination des coûts individuels. Le coût d'occlusion est fixé, lié au seuil minimal d'appariement pour la corrélation :

$$occ = (1 - seuil\_min(cor(i,j,N))) / 2.$$

La configuration choisie permet de mettre en évidence les occlusions détectées par l'algorithme, comme l'illustre la figure B.1.2.3.

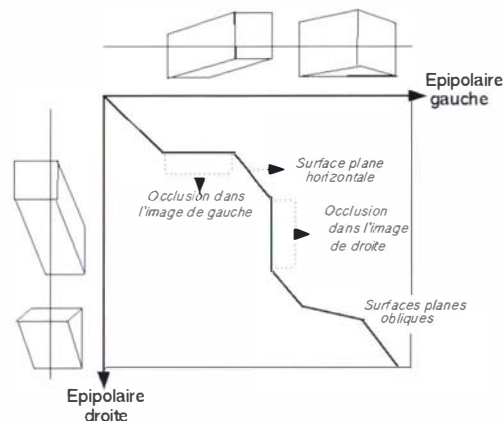


figure B.1.2.3 : exemple de chemin de coût optimal

Notons que l'appariement d'un point de contour  $C$  peut éventuellement être remis en cause s'il n'est pas validé par ses voisins, sur la même ligne épipolaire, de type non contour  $P+$  et  $P-$ , c'est-à-dire si la condition suivante n'est pas vérifiée :

$$\min[ | disp(C)-disp(P+) | , | disp(C)-disp(P-) | ] \leq Sc$$

$Sc$  représente le seuil de continuité au-delà duquel, la pente étant alors jugée trop élevée, on estime être en présence d'une discontinuité (en pratique,  $Sc$  est choisi égal à 1). Dans ce cas, les 2 intervalles de l'image gauche (resp. droite) séparés par ce contour (resp. son homologue) sont fusionnés et on réitère l'opération d'appariement sur le nouveau couple d'intervalles.



## Analyse des résultats

Des exemples de résultats obtenus avec cet algorithme sont illustrés en figures B.1.2.4 (c et d).

Au regard de l'objectif qualitatif que l'on s'était fixé au départ, les résultats sont satisfaisants :

- l'image de disparité brute —avant interpolation— est dense : selon le coût d'occlusion choisi, 60 % à 90 % des pixels de l'image de référence sont appariés.
- les disparités sont peu bruitées. Quelques zones de bruit subsistent, qui proviennent souvent d'un mauvais appariement initial des points de contour, propagé lors de la seconde phase.
- les éléments de sursol sont bien restitués, surtout en ce qui concerne le bâti.
- le traitement est rapide, équivalent à la corrélation par balayage : il faut environ 5 mn de temps CPU sur station AXP pour le traitement du couple de la figure B.1.2.4. La phase d'appariement photométrique représente environ 90 % du temps de calcul global.

On constate que les effets de propagation d'erreurs propres aux techniques de balayage ont disparu ; les résultats s'avèrent, à quelques détails près, indépendants du sens de balayage. Les objets problématiques de la scène (pavillons, végétation...), très mal restitués par la corrélation classique, sont mieux appréhendés. De plus, l'algorithme se comporte correctement face à un domaine de disparité étendu : le choix d'un domaine 2 fois plus grand ne modifie à tort que 1 à 2 % des appariements.

Le choix des coûts d'occlusion est peu problématique : pour les contours, on utilise la même valeur (0,1) sur l'ensemble des couples traités, et on choisit un coût de 0,2 ou 0,25 pour l'appariement photométrique selon la densité de points désirée. Enfin, les fenêtres ont une dimension de 7 sur 7 ou 9 sur 9 selon la résolution planimétrique des images.

Notons toutefois que la localisation des discontinuités est peu précise (choix d'une fenêtre de corrélation de taille fixe), et que la restitution des zones très homogènes est parfois insuffisante (comportement caractéristique de la plupart des méthodes locales). Ces imprécisions devraient être corrigées dans des étapes ultérieures de reconstruction [MAÎTRE, LUO 92].

## Extraction du sursol

La plupart des travaux sur l'extraction du sursol traitent le cas de bâtiments isolés. Or en milieu péri-urbain, les bâtiments et les arbres sont souvent juxtaposés; on propose donc ici une méthode générale pour extraire les zones de sursol, sans critère de forme.

### Démarche

La façon la plus classique de procéder pour extraire le sur-sol est d'appliquer un filtrage "chapeau haut de forme" (fermeture morphologique plus différenciation) à l'image d'élévation interpolée, puis de seuiller le résultat selon des critères de taille et de forme. Cette technique présente deux inconvénients :

1 - Une phase d'interpolation est nécessaire. Elle est problématique car on perd alors la signification des frontières des zones de sursol, en particulier dans le cas de grandes occlusions. Nous pensons de plus qu'il est intéressant de conserver les zones non appariées, afin d'exploiter ultérieurement cette connaissance en terme de comportement stéréoscopique.

2 - Le choix d'un élément structurant est nécessaire pour le filtrage morphologique. Sa taille est alors liée à la taille maximale que l'on s'autorise pour une zone de sursol. Il est dans ce cas difficile de gérer le cas de plusieurs bâtiments juxtaposés ou de zones boisées.

C'est pourquoi on propose une approche qui s'applique aux données brutes - non interpolées - et qui ne nécessite pas la définition d'un sursol maximal. Elle consiste à créer dans un premier temps une représentation symbolique de la scène, puis à exploiter le graphe résultant pour extraire le sur-sol.

L'image des disparités est d'abord ramenée dans l'espace objet afin de former un Modèle Numérique de Terrain. Celui-ci est incomplet en raison des zones non appariées et des zones d'occlusion. Ce MNT est segmenté en régions d'altitude homogène à l'aide d'un algorithme de croissance et fusion (uniquement appliqué aux points d'altitude connue). Ces régions (régions "terrains") forment les noeuds du graphe, les relations d'adjacence entre deux régions forment les arcs. Les relations de voisinage sont alors étendues aux référentiels des images droite et gauche pour s'affranchir des problèmes d'occlusion. Toutefois, en cas de zones homogènes non appariées, différents éléments d'un même objet peuvent être dissociés (certains toits par exemple). On définit donc également des relations de voisinage d'ordre 2, dans le cas spécifique de deux régions terrains séparées, dans chacun des référentiels images, par une région de niveaux de gris homogènes (région "image") ; les régions images droite et gauche correspondantes doivent de plus être "compatibles" (similarité des niveaux de gris, recouvrement).

Les minima locaux d'altitude servent alors de référence pour les zones de type "SOL", tandis que les maxima locaux servent d'initialisations pour les zones "SURSOL". Les étiquettes sont propagées, grâce aux liens de voisinage, en fonction des écarts d'altitudes entre deux régions, puis elles sont validées par des critères surfaciques et contextuels. On obtient finalement une nouvelle segmentation des points terrains (sous-segmentation de la précédente), où chaque élément correspond soit au sol, soit à une zone de sursol connexe (au sens du voisinage choisi). Puis dans la mesure du possible (différences d'altitude marquées) on tente de dissocier les différents objets présents au sein d'une même zone de sursol.

## Résultats et prévisions

Des images en sortie de traitements (segmentation et extraction) sont présentées en figure B.1.2.4 (e et f). Les zones de sursol sont correctement extraites, malgré leur taille parfois importante et la présence de zones non appariées. Deux points essentiels doivent cependant être approfondis :

- La définition des relations de voisinage d'ordre 2 doit être affinée et davantage exploitée : en particulier, elle doit pouvoir mener à une interprétation des zones non appariées, et donc à une meilleure compréhension de la scène.

- La propagation d'étiquette peut échouer : il suffit que la discontinuité d'un objet de type sur-sol avec son environnement soit localement peu marquée. Il semble que la relaxation markovienne, technique qui prend simultanément en compte l'ensemble des interactions, soit mieux adaptée à notre problématique. Il nous faut donc comparer les 2 approches.

## Conclusion et perspectives

Les techniques de mise en correspondance et d'extraction du sursol que nous avons présentées s'intègrent dans un processus plus général de description 3D de scènes semi-urbaines. Les premiers résultats nous semblent intéressants et exploitables dans le cadre de l'approche choisie :

- Utilisation coopérative d'informations monoscopiques et stéréoscopiques ; la connaissance de disparités nous permet en outre d'utiliser les 2 images du couple. On espère ainsi augmenter la robustesse du système en dépassant les limites de l'appariement d'une part, des projections images d'autre part.

- Mise en place d'une approche hiérarchique : extraire et analyser le sur-sol permet de mieux aborder la restitution de scènes complexes (bâtiments juxtaposés, présence d'arbres...). Il est en effet intéressant de disposer, le plus tôt possible, d'un maximum d'information a priori sur la nature des surfaces : détermination de zones d'intérêt, recherche guidée de primitives (distinction végétation/bâti, choix automatique des modèles de bâtiments), gestion de différents algorithmes de reconstruction, estimation de la fiabilité des modèles de surfaces et des altitudes restituées.

Il reste encore un travail très important à effectuer, mais on espère aboutir à un système de restitution capable de gérer diverses spécificités d'objets en milieu péri-urbain.

## Publications

[BAILLARD et al 96] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet, H. Maître : *Appariement stéréoscopique d'images aériennes en milieu péri-urbain*, 10ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, Rennes (F), in Proceedings pp. 247-256, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960006/C-COM, 1995.

## Références

[DANG 94] T. Dang : *Restitution automatique de bâtiments*, Thèse de doctorat de l'E.N.S.T., 94E023, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940036/C-THE, décembre 1994.

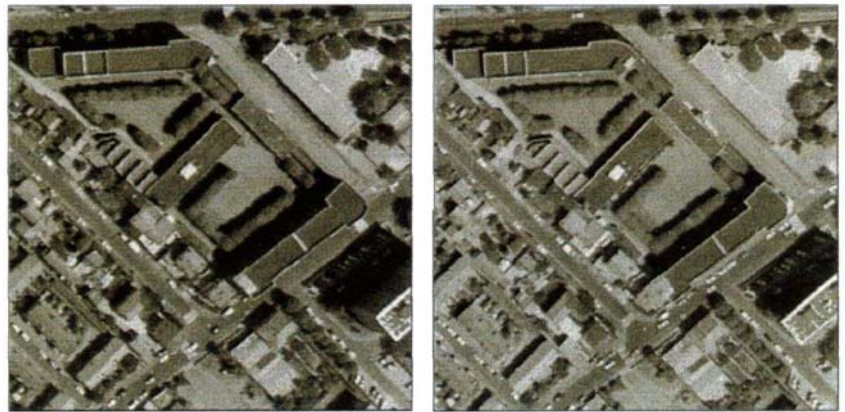
[DERICHE 87] R. Deriche : *Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector*, International Journal of Computer Vision, pp. 167-187, may 1987.

[GUIAVARC'H 94] P. Guiavarc'h : *Mise en place relative automatique d'un couple stéréoscopique*, Bulletin d'information de l'IGN n. 62, pp. 21-26, 1994.

[LUO 91] W. Luo : *Utilisation des modèles de surface en stéréovision*, Thèse de doctorat de l'E.N.S.T., 91E016, mai 1991.

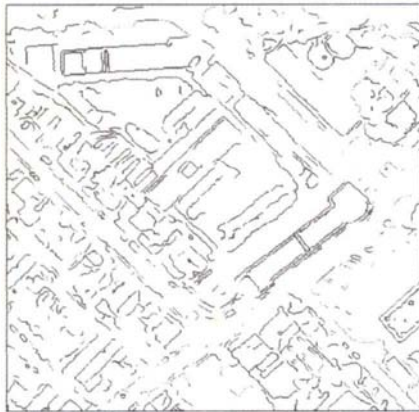
[MAÎTRE, LUO 92] H. Maître, W. Luo : *Using models to improve stereo reconstruction*, IEEE Trans. on PAMI, Vol. 14, n° 2, pp. 269-277, feb. 1992.

[MOHAN et al 89] R. Mohan, G. Medioni, R. Nevatia : *Stereo error detection, correction, and evaluation*, IEEE Trans. on PAMI, 11(2), feb. 1989.



(a)

(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**figure B.1.2.4 : les différentes étapes du traitement.**

(a) et (b) Images originales rééchantillonnées en géométrie épipolaire (390 x 390 pixels).

(c) et (d) Images des disparités en sortie de chacune des 2 étapes d'appariement

(les pixels les plus sombres sont les points les plus élevés, les zones blanches correspondent aux pixels non appariés).

(e) Image des disparités segmentées dans le référentiel image gauche (niveaux de gris = disparité moyenne).

(f) Zones de sursol extraites : chaque niveau de gris correspond à un objet sursol.



## B.2.1 Fabrication d'une caméra numérique aérienne

par Christian Thom et Isabelle Jurvillier

### Introduction

Une nouvelle caméra numérique, basée sur un capteur matriciel de 3072 par 2048 pixels de Kodak, destinée à la photographie aérienne et dédiée aux principales applications de l'Institut Géographique National, a été conçue, construite et mise au point au laboratoire OEMI durant l'année 1995. Le premier essai en vol de cette caméra a eu lieu le 15 janvier 96 sur la région d'Amiens. Les images rapportées de cette mission ont enfin permis d'arriver au but recherché depuis quelques années, qui était de prouver que les images directement numériques présentaient des atouts certains face aux clichés argentiques numérisés : qualité radiométrique et délais de livraison des images.

### Contexte - objectifs

La décision de fabriquer une caméra à l'IGN a été prise à la fin de l'année 94, car la précédente caméra, qui avait été achetée et adaptée pour pouvoir être embarquée, ne pouvait pas, du fait de caractéristiques radiométriques médiocres, atteindre le but fixé [THOM et al. 94a]. D'autre part, il ne s'est trouvé aucun industriel pour prendre la décision de fabriquer une telle caméra [THOM et al. 94b], car le marché de ce produit est encore mal défini, probablement faute de prototypes vraiment convaincants. Notre but était de prouver que les capteurs CCD, grâce à leur sensibilité et leur dynamique, produisaient des images numériques de qualité radiométrique nécessairement supérieure à celle des clichés argentiques numérisés. A l'heure où les processus photogrammétriques tendent à être de plus en plus automatisés, les images numériques prennent en effet de plus en plus d'importance [GEOMATICA 95]. Il est donc important de chercher à obtenir les images numériques de la meilleure qualité qui soit, et, outre celui de l'IGN, de nombreux projets ont vu le jour ces dernières années [JADKOWSKI et al. 94] [KALTENECKER et al. 94]... De plus, les caméras CCD, du fait de ces mêmes caractéristiques radiométriques, peuvent être utilisées dans des conditions d'éclairage moins draconiennes que les caméras traditionnelles à film argentique. Ceci permet d'étendre les périodes de l'année pendant lesquelles les prises de vue aériennes peuvent être effectuées. Enfin, les images étant disponibles dès la sortie de l'avion, les délais de livraison du produit final (images, orthophotos ou cartes) sont raccourcis de toute la phase de développement et de numérisation des clichés. Les images numériques acquises par cette caméra ont été largement distribuées au sein de l'IGN, et à l'extérieur de l'IGN, de façon à connaître l'opinion des utilisateurs sur ce qu'elles apportent réellement par rapport aux clichés argentiques numérisés.

### Principales caractéristiques de la nouvelle caméra

La première partie du travail de conception de cette caméra était de trouver le capteur qui conviendrait le mieux à notre projet. Il s'agissait non seulement de s'assurer de ses caractéristiques radiométriques, mais aussi de sa pérennité, ainsi que des améliorations qui pouvaient lui être apportées par son constructeur. C'est le capteur matriciel monochrome de Kodak, le KAF-6300 de 3072 par 2048 pixels, qui a été choisi pour les principales raisons suivantes :

#### Vitesse de lecture de la matrice

La vitesse de lecture du capteur est une caractéristique importante pour une caméra aérienne, car il faut pouvoir acquérir et sauver les images suffisamment rapidement, ce paramètre conditionnant la taille minimum de pixel sol que l'on peut obtenir. Le capteur KAF-6300 peut être lu à 5 MHz, soit 1,3 seconde par image. Nos avions volant à une vitesse moyenne de 100 m/s, et les images se recouvrant de 60%, cela conduit à une taille minimum pour le pixel sol de 16 cm. Dans notre système, le débit des données est limité par le débit des disques durs sur lesquels les images sont sauvées qui est de 3 MB/s. Ainsi, la taille minimum du pixel sol est 24 cm pour des images en 8 bits par pixel, et 48 cm pour des images 12 bits.



## Grande dynamique

La dynamique de la caméra est de 3000 (capacité maximum des puits de potentiel de 86 000 électrons et 29 électrons de bruit de lecture). Le bruit de photons est donc dominant sur 99% de la dynamique [THOM et al 95]. C'est pour cette raison que le rapport Signal / Bruit sera nécessairement meilleur pour une image numérique que pour une image numérisée, dans laquelle le bruit de photons est également présent, mais aussi le bruit de grain ainsi que le bruit du scanner qui a servi à la numériser. Si l'on ajoute que les capteurs CCD sont également plus sensibles que les films et qu'en outre leur réponse à l'éclairement est linéaire, on peut s'attendre à ce qu'il soit possible de distinguer des détails dans les parties très sombres des images numériques alors que ce ne le serait pas dans une image numérisée.

## Faible courant d'obscurité

Le courant d'obscurité, constitué de charges produites par l'agitation thermique dans le substrat, est dans le cas du capteur KAF-6300 très faible, 50 électrons/pixel/s à la température ambiante de 25°C. Il est donc inutile de refroidir ce capteur, ce qui simplifie son montage et augmente la fiabilité du système.

## Autres caractéristiques

Ce capteur est d'une excellente qualité cosmétique, les seuls pixels défectueux étant d'une part peu nombreux, d'autre part isolés.

Il existe une version couleur du capteur qui peut directement remplacer la version monochrome, sans développement électronique supplémentaire.

Kodak poursuit le développement de cette gamme. Il existe désormais un capteur de 4096 par 4096 pixels dans la même technologie que le KAF-6300.

La production de ces capteurs est assurée par le fait que Kodak est le premier utilisateur de ses produits pour sa gamme d'appareils photos professionnels, et qu'il fournit les capteurs pour une gamme de caméras scientifiques (Megaplus).

Malheureusement, ce capteur ne dispose pas de système d'anti-éblouissement.

# Optique, ordinateur pilote et système de sauvegarde

## Optique et système de compensation de filé

Nous ne disposons pour le moment que d'une optique 24 mm d'Optique Thévon, qui avait été développée pour la précédente caméra. L'obturateur central intégré a une vitesse d'obturation maximum de 1/100 s. Nous devons prochainement adapter une nouvelle optique 50 mm plus rapide (1/1000 s) de Zeiss-Schneider.

Les conditions de prise de vue sont parfois telles que le temps de pause est très long par rapport à la vitesse de déplacement de l'avion. Sans correction, il conduirait à avoir un filé important dans les images. C'est pour cette raison que nous avons implanté dans cette caméra un système connu en anglais sous le nom de "Time Delay Integration System" (TDI), système qui permet, si l'on connaît le déplacement relatif de la scène photographiée pendant le temps d'exposition, de déplacer les charges dans le capteur de façon à suivre ce mouvement. Le nombre de lignes à déplacer ainsi que la vitesse à laquelle il faut les déplacer sont calculées à partir du temps d'exposition, de la taille du pixel sol, qui est lié à l'altitude de vol pour une focale donnée, et de la vitesse de l'avion. Altitude et vitesse sont données en direct par le système GPS embarqué à bord de nos avions. La précision de la correction est d'un demi pixel. La vitesse maximale du TDI dans notre caméra est de 2500 pixels/s.

## Ordinateur pilote

La caméra intègre une carte microcontrôleur qui gère les fonctions de base telles que la lecture de la matrice, le contrôle de l'obturateur, ... Elle reçoit les ordres d'un ordinateur via une liaison RS232. La numérisation du signal vidéo issu du capteur est assurée dans la caméra. Les données, qui sont numérisées sur 12 bits, ainsi que quelques signaux de contrôle, sont transférés via une liaison RS422 vers une carte d'interface qui les formate pour être compatible avec le format des données en entrée de la carte d'acquisition. Celle-ci est un produit d'ELTEC qui permet d'acquérir des données vidéo sous plusieurs formats et de les transférer en parallèle dans la mémoire centrale de la carte CPU, également un produit d'ELTEC, qui contrôle l'ensemble du système. Une fois en mémoire centrale, les données peuvent être sauveées sur disque dur, affichées à l'écran ...

*Système de sauvegarde* : Le système de sauvegarde est constitué de deux disques durs amovibles "à chaud" de 4 GB chacun. Leur débit est de 3 MB/s. Quand un disque est plein, il est possible de le remplacer par un disque vide sans arrêter la prise de vue, ce qui permet d'étendre (presque) indéfiniment la capacité de stockage du système. Le système de base permet déjà de stocker 1200 images, représentant par exemple le survol d'une zone de 26 par 9 km<sup>2</sup> avec un recouvrement de 60 % entre images et de 10 % entre bandes, et un pixel sol de 25 cm.

Un schéma de l'ensemble du système est présenté figure B.2.1.1.

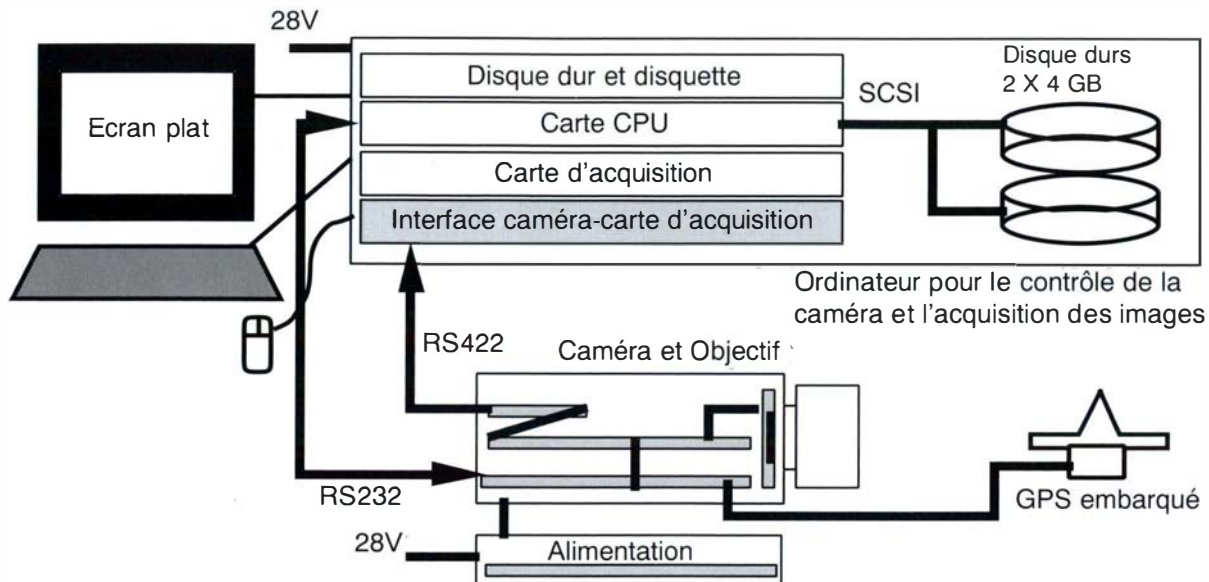


figure B.2.1.1 : schéma du système complet de prise de vue aérienne numérique

## La mission du 15 janvier 1996

### Caractéristiques de la mission

La mise au point de la caméra s'est achevée en novembre 1995, et nous devions la tester au plus vite en avion de façon à mettre en évidence certains problèmes qui ne pouvaient pas être découverts en labo. La mission a donc eu lieu le 15 janvier 1996 sur la vallée de la Somme, avant et après la ville d'Amiens, vers 1 h de l'après-midi [THOM et al. 96]. L'objectif qui fut utilisé est le 24 mm d'Optique Thévon. Un premier survol à 2 000 m (pixel sol de 75 cm) et un deuxième à 3 000 m (pixel sol de 1 m) ont permis d'acquérir une cinquantaine d'images stéréo. Une troisième bande de prise de vue, effectuée à 1200 m sur le chemin du retour, a permis d'obtenir quelques images au pixel sol de 45 cm.

L'éclairage hivernal, trop faible pour notre objectif dans lequel est intégré un ensemble de filtres, a conduit à poser 50 ms, ce qui est relativement long pour un cliché aérien. Pour toutes les images, il a donc fallu mettre en œuvre la compensation électronique de filé (5 à 6 pixels à 3 000 et 2 000 m, et 14 pixels à 1 200 m). D'autre part, le soleil, très bas sur l'horizon, éclaire fortement de faibles surfaces comme les façades directement orientées vers lui, et laisse de très larges zones plongées dans l'ombre. Les images apparaissent ainsi contrastées d'une façon assez inhabituelle.

Puisque le capteur ne dispose pas d'un système d'anti-éblouissement, une partie de la dynamique est réservée pour absorber les sur-illuminations que pourraient éventuellement provoquer des réflexions spéculaires. Ainsi, dans nos images, la moyenne des radiométries se situe aux alentours du quart de la dynamique. Toutes les images ont été acquises en 12 bits.

### Qualité d'image

Tout d'abord, il est à noter que le système de compensation électronique de filé fonctionne très bien. Tous les détails inférieurs à la taille du pixel sol apparaissent bien sur un seul pixel.

Ensuite, et même si une partie de la dynamique est "perdue" pour prévenir les éblouissements, la qualité radiométrique de ces images est très bonne. Tous les détails contenus dans les images, aussi bien dans leurs parties sombres que dans leurs parties claires sont visibles. En particulier dans les zones d'ombre, la sensibilité du capteur et le très bon rapport Signal sur Bruit dans les très faibles niveaux d'intensité permettent de distinguer des détails extrêmement fins. Par exemple, des lignes haute tension, dont le diamètre est de 3 cm environ, dans des images au pixel sol de 75 cm, se détachent très nettement de la surface des lacs qu'elles traversent, grâce il est vrai au fait que leur albédo est très différent de celui de l'eau. Cependant, elles ne représentent que 1/20 pixel, et cette zone particulière se situe à des niveaux d'intensité très bas.

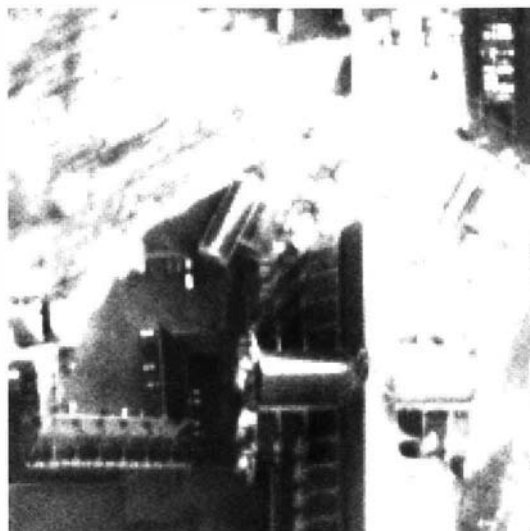
## Echantillons d'image

Les quelques échantillons d'image présentés ici ont pour but d'illustrer les qualités radiométriques de cette nouvelle caméra. Après l'examen des images, la principale conclusion est qu'il est utile, sinon nécessaire, de conserver des pixels de 12 bits si l'on veut préserver toute l'information contenue dans les images. En effet, ils représentent de l'information "vraie", même s'il n'est pas toujours facile de l'exploiter, en particulier à l'affichage, qui en général se fait avec seulement 6 bits. D'autre part, aucun procédé satisfaisant n'a été trouvé pour convertir des pixels de 12 bits en 8 bits tout en préservant l'information utile, d'autant plus qu'il n'est pas toujours facile de savoir ce qui est utile et ce qui ne l'est pas. Mais, cependant, s'il s'agit d'exploiter ces images au moyen de processus automatiques de traitement, les 12 bits d'information seront particulièrement importants car ils permettront que les processus automatiques, comme la corrélation par exemple, fonctionnent bien quelle que soit le niveau moyen de l'intensité dans l'image.



**figure B.2.1.2**

Cette imagerie de la cathédrale d'Amiens est représentée ici en choisissant un histogramme des niveaux d'intensité entre 0 et 1200. Cela permet d'afficher la plus grande partie de l'information contenue dans cette zone. La taille du pixel sol est de 75 cm.



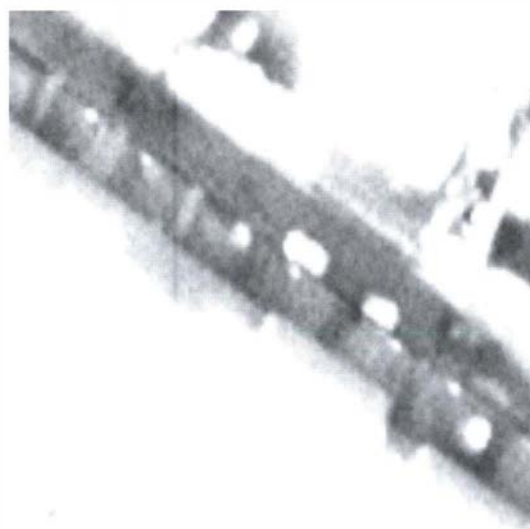
**figure B.2.1.3**

La même imagerie est ici présentée en étalant l'histogramme des niveaux de gris entre 200 et 400. Ainsi, on fait apparaître les détails contenus dans les parties sombres de l'image, tels ceux dans l'ombre de la cathédrale.



**figure B.2.1.4**

Cette imagerie représente un réseau de lignes haute tension qui se détachent nettement de la surface des lacs qu'elles traversent. Les niveaux de gris sont ajustés entre 200 et 300 pour faire apparaître ces détails. Le diamètre des lignes est de 3 cm et la taille du pixel sol de 75 cm. On distingue également sous les lignes les détails situés un peu en dessous de la surface de l'eau. Le bruit commence à être visible dans ces conditions.



**figure B.2.1.5**

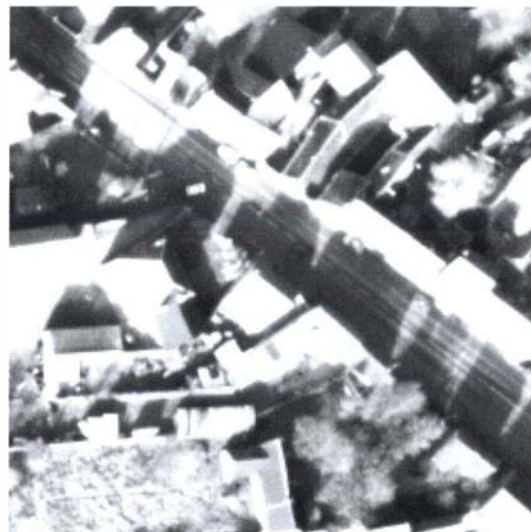
Cette imagerie, extraite d'une image à 45 cm de pixel sol, est affichée en ajustant les niveaux de gris entre 200 et 300. Les bords des toits, les limites entre cours, ainsi que les bords de la rue, apparaissent nettement.





**figure B.2.1.6**

Cette imagerie est extraite d'une image à 45 cm de pixel sol. Les niveaux de gris sont ajustés entre 0 et 3 000, ainsi les détails des façades très éclairés apparaissent.



**figure B.2.1.7**

La même imagerie est présentée en ajustant les niveaux de gris entre 300 et 700 de façon à voir le marquage au sol dans la rue.

## Conclusion

Les images produites par cette nouvelle caméra ont en effet permis de montrer que la qualité radiométrique des images produites par les capteurs CCD était très bonne. Pour montrer sans ambiguïté qu'elle est supérieure à celle des clichés numérisés, il faudra faire une mission en embarquant les deux types de caméras et en comparant les résultats obtenus. Il nous semble qu'il est nécessaire de conserver les pixels sur 12 bits si l'on veut préserver toute l'information contenue dans ces images. Bien sûr, il faut trouver un système qui permette d'afficher au mieux les images, par exemple en ajustant automatiquement l'histogramme des niveaux de gris de la zone affichée, si l'on doit en faire une analyse visuelle.

Les différentes images présentées ici ont illustré tout l'intérêt que présentait leur très grande dynamique. Cette caractéristique peut se révéler particulièrement importante dans le cas où la dynamique de la scène photographiée est elle-même importante. Il est justifié de penser que les capteurs CCD, du fait de leur sensibilité et de leur dynamique, sont mieux adaptés que les clichés numérisés pour ce type d'application, par exemple pour la production d'orthophotos en zone urbaine. Ces applications particulières tendent à se développer de plus en plus avec la généralisation des SIG [PIJOURLET et al. 96]. Les images directement numériques ne présenteraient pas seulement l'avantage d'être de meilleure qualité radiométrique, en particulier dans les ombres, elles pourraient également être utilisées directement dès l'atterrissage de l'avion par des processus automatiques de production d'orthophotos, réduisant les délais de livraison du produit final.

Les principaux développements envisagés sur cette caméra sont l'implantation d'un capteur couleur, l'utilisation de nouveaux objectifs, l'accélération du débit de données afin de réduire la taille minimum du pixel sol, l'assemblage de plusieurs caméras pour réduire les temps de vol.

## Références

- [THOM et al. 94a] C. Thom, I. Jurvillier, "Geometrical and radiometrical calibrations of a large format aerial digital camera designed for photogrammetry", First International Airborne Remote Sensing Conference, Strasbourg, 12-15 Septembre 1994.
- [THOM et al. 94b] C. Thom, "Workshop on digital camera for photogrammetry", réunion OEEPE des 28-29 Septembre 1994, rapport IGN.
- [GEOMATICA 95], Revue spéciale de Geomatica sur la photogrammétrie à l'aide d'images numériques au Canada, volume 49, numéro 4, Décembre 1995.
- [JADKOWSKI et al. 94] M.A. Jadcowski et al., "Aerial CCD camera system for pipeline right-of-way management", First International Airborne Remote Sensing Conference, Strasbourg, 12-15 Septembre 1994.



[KALTENECKER et al. 94] A. Kaltenecker et al., "*Digital photogrammetric assembly (DPA) - an airborne stereo and multispectral imaging and evaluation system*", First International Airborne Remote Sensing Conference, Strasbourg, 12-15 Septembre 1994.

[PIJOURLET et al. 96] P. Pijourlet, M. Pochon, "*L'utilisation de la photo aérienne dans le système d'information géographique du Grand Lyon*", revue Géomètre de janvier 1996, pp 34-37.

## **Publications**

[THOM et al. 95] Ch. Thom, I. Jurvillier, "*Mesure de la qualité radiométrique de la caméra numérique de l'IGN équipée du capteur Kodak KAF-6300*", 6 Décembre 1995, rapport interne IGN

[THOM et al. 96] Ch. Thom, I. Jurvillier, "*Compte-rendu de la première mission aérienne de la nouvelle caméra numérique*", 29 Janvier 1996.

## B.2.2 Prototype d'instrument aéroporté de télémétrie laser à champ large

par Olivier Bock

### Introduction

Depuis le début du siècle il a été observé que de nombreux phénomènes géophysiques se traduisent par des déformations verticales du sol de l'ordre du millimètre, accompagnées presque toujours d'une composante horizontale plus faible. Ce sont par exemple des mouvements d'origine tectonique, des glissements de terrain, des variations de contraintes dans le sous-sol liées à l'extraction de fluides ou de solides. La seule technique pouvant atteindre une précision du millimètre est actuellement le nivellement de précision. Mais d'autres techniques d'observation des phénomènes géophysiques ont vu le jour durant ces dernières décennies, citons principalement l'interférométrie à longue base (VLBI), la télémétrie laser aéroportée ou satellisée [LUTZ et al, 82], [COHEN et al, 87], le positionnement par procédé GPS différentiel [FOURMAINTRAUX et al, 94], la télémétrie laser sur satellites (SLR) [DEGNAN, 93] et l'interférométrie radar à ouverture synthétique (SAR) [MASSONET et al, 95]. Ces différentes techniques ont des précisions allant de 5 mm à quelques cm. La précision ultime des mesures de distance est limitée par la traversée atmosphérique produisant à la fois des erreurs systématiques et aléatoires. Pour cette raison, la précision des techniques radio (VLBI et GPS) ne peut être meilleure que quelques cm alors que pour des longueurs d'ondes optiques il est possible d'arriver à quelques mm.

Le système de télémétrie laser aéroporté à champ large que nous développons à l'I.G.N., voir figure B.2.2.1, doit permettre de mesurer simultanément un ensemble de distances, de l'avion à un réseau de rétro-rélecteurs (coins de cube) placés au sol. Nous avons montré, lors d'une étude par simulation [KASSER et al, 92], que nous pouvions retrouver la position relative des réflecteurs au sol avec une précision du millimètre sur la composante verticale, à partir de ces mesures de distances, moyennant quelques hypothèses sur la précision des différents éléments du système.

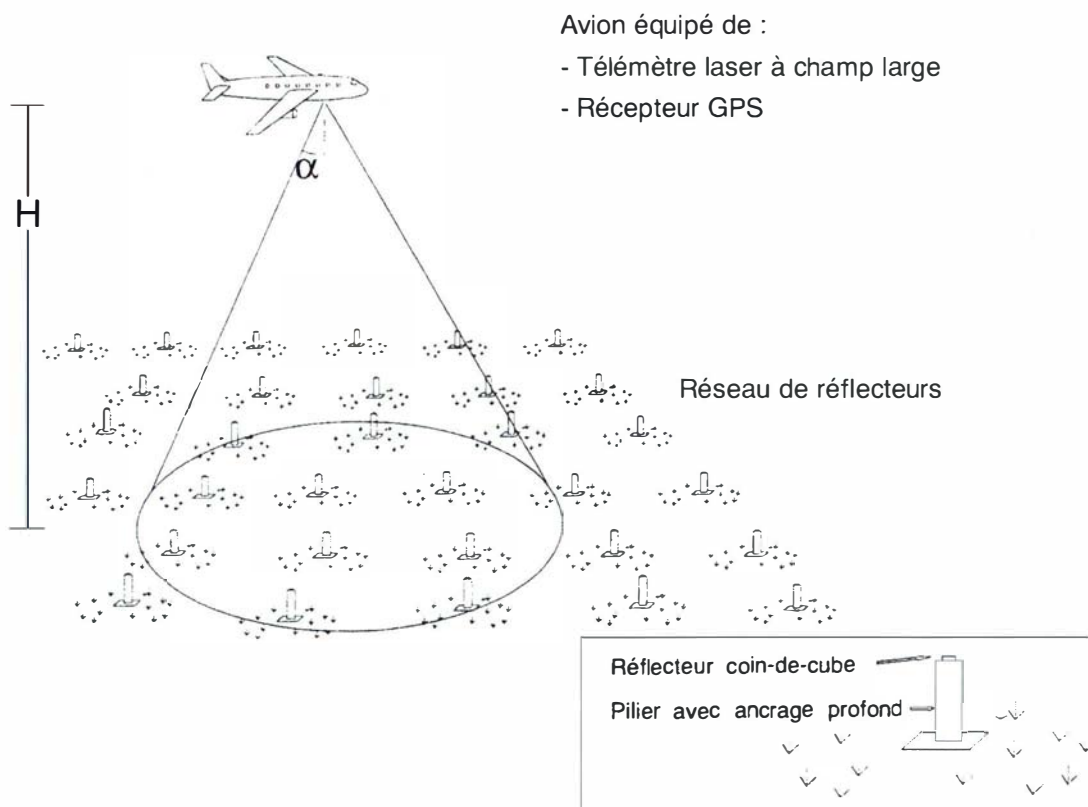


figure B.2.2.1 : application typique du système de télémétrie laser à champ large

## 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 la première étape de simulation nous avons fait une étude de l'instrumentation, puis engagé la réalisation d'un prototype. Le premier laser envisagé (Quantel Brillant : Nd : YAG de 350 mJ sur 5 ns à 1,064  $\mu\text{m}$ ) s'est très vite révélé inapte pour cette application car il introduisait des erreurs systématiques sur les mesures de distances, dues à un mode transverse non stabilisé. Après avoir envisagé différentes modifications de ce laser nous avons finalement opté pour une technologie différente (laser à modes bloqués). En particulier nous avons eu à disposition le laser de la Station Laser Ultra-Mobile de l'Observatoire de la Côte d'Azur. La caractérisation de ce laser a indiqué qu'il pouvait convenir pour notre application [BOCK, 95a]. Nous avons depuis réalisé deux expérimentations sur des sites équipés de réflecteurs avec le système de télémétrie monté à bord d'un véhicule utilitaire. La première de ces missions a été réalisée à Saint-Etienne de Tinée, dans les Alpes du Sud, sur le glissement de terrain pré-équipé en coins-de-cube pour la surveillance automatique. Cette mission a validé l'utilisation du prototype dans des conditions de terrain et le principe de mesure, mais la géométrie du site n'a pas permis l'acquisition de données suffisantes pour tester l'inversion du système, c'est-à-dire le calcul des positions des réflecteurs. Nous avons alors réalisé une deuxième mission terrestre à Combs-la-Ville, en région parisienne, où le terrain a dû être équipé spécialement pour les mesures. L'exploitation de ces mesures est en cours actuellement. La validation du procédé par cette expérimentation devrait amener à la préparation d'une mission aéroportée pour effectuer un test final dans les conditions opérationnelles pour lesquelles le système a été conçu.

## Description du procédé

### Description du principe

Le système, présenté à la figure B.2.2.1, est composé :

- d'un réseau de rétro-réflecteurs laser (coins de cube) répartis sur une grille d'environ 10 km de côté et de 1 km +/- 100 m de maille, orientés vers le ciel et liés au sol par un ancrage profond. La position approchée des réflecteurs est supposée connue à 10 cm près, elle peut être obtenue par une technique GPS statique.

- d'un récepteur GPS embarqué et d'un récepteur GPS au sol, permettant d'avoir la position approchée de l'avion à chaque tir par une technique de trajectographie. La précision de la trajectoire, pour des récepteurs monofréquence est meilleure que 50 cm pour des bases relativement courtes.

- d'un télémètre laser embarqué dans un avion et pouvant mesurer simultanément, pour une impulsion émise, un ensemble d'échos renvoyés par les réflecteurs. Au niveau de l'émission 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]. Au niveau de la réception il faut pouvoir distinguer des échos proches et en extraire l'information de distance avec une précision de l'ordre de quelques centimètres (5 cm au plus). Nous avons montré qu'en laboratoire la précision de la mesure de distance est de quelques millimètres [BOCK et al, 95] lorsque le rapport signal-sur-bruit est élevé (typiquement supérieur à 100).

Lors des survols de la zone où sont implantés les réflecteurs, le télémètre laser accumule pour chaque tir les enregistrements numériques des échos issus des réflecteurs situés au sol. Ces enregistrements sont ensuite traités par informatique pour en extraire des mesures de distances entre la position de l'avion au moment du tir laser et les réflecteurs. En fait, ce sont plutôt les différences de distances entre les différents réflecteurs qui sont mesurées, car le moment précis du tir n'est pas enregistré ; ce sont des pseudo-distances. Ceci a l'avantage de rendre les mesures pratiquement insensibles aux perturbations apportées par la traversée des couches de l'atmosphères situées entre l'avion et le sol. On détermine ensuite pour chaque écho le réflecteur qui en est l'origine, grâce aux positions approchées de ceux-ci, mesurées lors de l'établissement du réseau de mesure, ainsi qu'à la position de l'avion au moment du tir, mesurée par trajectographie GPS. Ces mesures sont ensuite réduites par une optimisation par moindres carrés par exemple, et le résultat en est la position précise des réflecteurs.

La simulation complète tridimensionnelle [KASSER et al, 92] a permis d'optimiser les paramètres du système en garantissant une précision finale inférieure à 1 mm sur la composante verticale des réflecteurs. L'angle de divergence du laser et l'altitude de l'avion doivent être d'environ 15° et plus de 5 000 mètres afin d'avoir au moins 10 distances mesurées simultanément. 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.

## Instrumentation

L'instrumentation embarquée, voir figure B.2.2.2, est composée :

- D'un laser Nd:YAG à modes bloqués (Quantel) émettant une impulsion d'environ 50 mJ sur 100 ps à 1,064  $\mu\text{m}$ . Il est basé sur une cavité à miroirs de réflectivités uniformes, d'un déclenchement passif (absorbant saturable) et d'un blocage de modes actif (par acousto-optique). Un diaphragme intra-cavité permet la sélection du mode transverse  $\text{TEM}_{00}$ . L'oscillateur produit un train d'impulsions de 100 ps dans une enveloppe de 70 ns, duquel une impulsion est extraite puis amplifiée. Le principal avantage de ce laser est d'éviter les retards dans le faisceau, grâce à stabilisation du mode transverse obtenue lors de la construction. Le champ large à l'émission est obtenu soit par une lentille divergente, soit par un dépoli.

- D'un détecteur, composé d'une photodiode PIN de grande surface active (1  $\text{cm}^2$ ) et de rendement quantique maximum à 1,064  $\mu\text{m}$  (0.7 A/W). Elle est suivie d'un étage amplificateur (transimpédance de 3 000 V/A) dont la bande passante est de 17 Mhz (avec la photodiode). Cette faible bande passante permet néanmoins d'estimer la position des impulsions dans le signal détecté avec une précision d'environ 14 ps, même après un échantillonnage avec une période de 1 ns.

- D'un oscilloscope numérique (Lecroy 7200), échantillonnant à la cadence de 1 Géch./s. Sa bande passante est limitée à 500 Mhz et peut être réduite à 95 Mhz avant échantillonnage. Cet oscilloscope est piloté par un PC portable, via une liaison GPIB, afin d'acquérir les enregistrements en temps réel. Le recalage des temps de l'oscilloscope et du récepteur GPS embarqué est effectué par l'émission d'un signal depuis le PC.

- D'un récepteur GPS monofréquence (Sercel NR101), de période de mesure de 0,6 s.

- D'un PC portable (Fieldworks 7500) doté d'une interface d'instrumentation GPIB et d'une liaison SCSI permettant de sauvegarder les mesures sur un D.A.T.

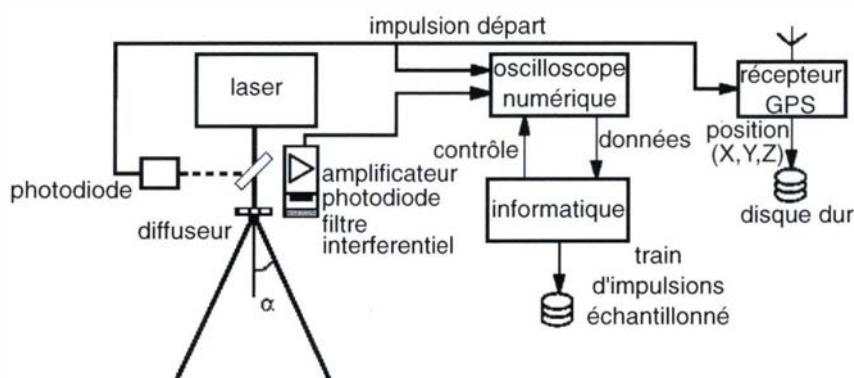


figure B.2.2.2 : instrumentation embarquée

Les limitations de précision de la mesure de distance introduites par l'instrumentation ont été mises en évidence lors de la caractérisation des différents étages du système [BOCK 94a]. Nous allons les rappeler brièvement ci-dessous.

Le bruit du détecteur est un bruit Shottky, produit par le signal, le bruit de jour et le courant d'obscurité. Le bruit de jour est réduit à l'aide d'un filtre interférentiel (20 nm de largeur de bande à 1,064  $\mu\text{m}$ ). Le bruit de détecteur total est donc de 200  $\mu\text{V}$  pour 100 mV de signal en sortie. Le bruit thermique dû à l'impédance d'entrée de l'amplificateur est négligeable devant le bruit généré par les composants actifs, qui vaut environ 260  $\mu\text{V}$  à la sortie de l'amplificateur (pour une photodiode non éclairée). Le bruit dans l'oscilloscope (additif et quantification) est de 230  $\mu\text{V}$ . D'autres phénomènes dégradent également le signal, en particulier l'échantillonnage, mais son effet est limité par la faible bande-passante de la détection. Notons que ces bruits sont de statistique gaussienne et que nous pouvons négliger les effets de la détection individuelle des photoélectrons, suivant une statistique de Poisson, car la partie utile des signaux correspond toujours à un grand nombre de photoélectrons. L'oscilloscope introduit également des incertitudes temporelles, d'abord sur le déclenchement de l'échantillonnage, que l'on peut modéliser par une variable aléatoire de densité uniforme sur 1 ns, puis sur chaque échantillon mais cette dernière est très faible (de l'ordre de la picoseconde). D'autres effets comme la dépendance de la réponse du détecteur avec l'intensité du signal n'ont pas été mis en évidence mais peuvent apparaître à l'échelle de la dizaine de picosecondes.



## Traitement de l'information

La figure B.2.2.3 présente un diagramme des informations dans le système réparties dans différentes couches indiquant la chronologie (du haut vers le bas). La première couche représente la mesure approchée des positions des réflecteurs, elle peut être réalisée par une technique GPS statique. La deuxième couche représente la mission aérienne, produisant les mesures de distance, à l'aide du télémètre laser, et les mesures de positionnement approché de l'avion, par GPS différentiel. La précision des mesures GPS, évaluée après la phase de traitement n'a pu être évaluée que lors de la première expérimentation (voir ci-dessous). Les couches suivantes représentent les traitements des mesures : la troisième couche aboutit aux distances approchées, entre l'avion et l'ensemble des réflecteurs. Celles-ci servent alors, dans la quatrième couche, à évaluer grossièrement (à 1 ns près) le biais instrumental pour chaque tir et à attribuer un réflecteur à chaque écho mesuré. Le traitement du signal à ce niveau consiste à estimer la position des échos dans le signal par le maximum de la fonction d'intercorrélation. La dernière couche représente l'inversion du problème, c'est-à-dire l'optimisation des positions des réflecteurs et de la trajectoire du véhicule à partir des pseudo-distances estimées précédemment.

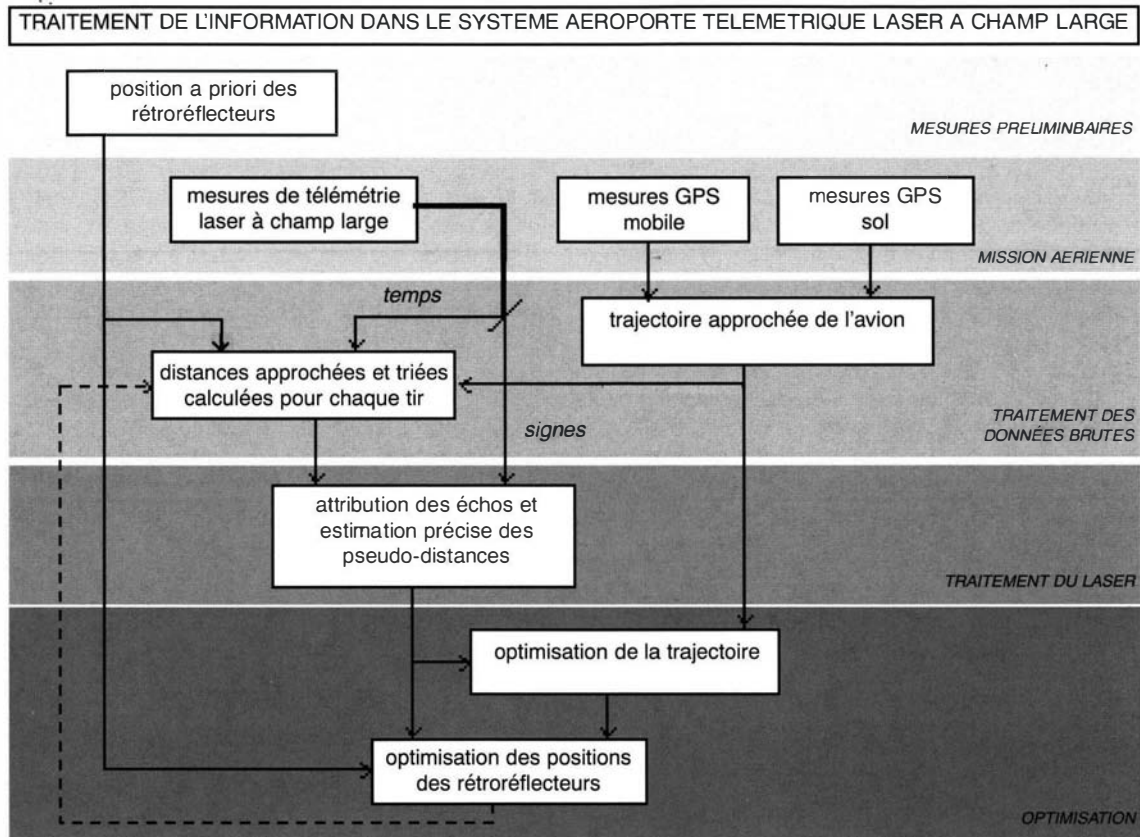


figure B.2.2.3 : traitement des informations

## Avancement dans la validation du procédé

### Instrumentation et traitement du signal

Nous avons commencé par caractériser expérimentalement les instruments composant le télémètre (laser, oscilloscope et détection) et conjointement, nous avons étudié plusieurs méthodes d'estimation de la position (instant d'arrivée) des échos dans le signal [BOCK, 94a]. Les méthodes optimales bien connues sont celles du minimum de la variance d'erreur ou du maximum de vraisemblance. Dans notre cas, le bruit prédominant est d'origine électrique, une technique de filtrage optimal (de Wiener) permettant de maximiser le rapport signal-sur-bruit devrait donc convenir. Mais comme nous ne connaissons pas exactement l'enveloppe de l'impulsion, ni le spectre du bruit, une méthode optimale n'est pas envisageable. Nous avons donc retenu une méthode de détection du maximum de corrélation entre le signal mesuré et une impulsion de référence. Une modélisation complète de l'instrumentation a permis d'évaluer par simulation la précision de cet estimateur de distance. Nous avons trouvé 6,8 mm sur la différence de deux pseudo-distances avec un rapport signal-sur-bruit d'environ 100. L'instrumentation (source des mesures de télémétrie dans la couche 2) et son traitement du signal associé (couche 3) semblaient donc compatibles avec la précision recherchée (mieux que 3 cm sur la distance) mais nécessitaient une validation sur des données expérimentales.

Les mesures en laboratoire ont rapidement mis en évidence les limitations du laser à cavité instable et miroirs gaussiens (Quantel Brillant), initialement envisagé, présentant des retards importants (jusqu'à 3 ns) des impulsions mesurées sur les bords du faisceau [BOCK, 94b]. Nous avons alors réalisé une analyse, par simulation, du comportement du faisceau laser : effets de distorsions du mode transverse et des interférences entre modes longitudinaux sur les enveloppes des impulsions échantillonnées, quantifiés par la dispersion de l'estimation des positions relatives des impulsions mesurées. Nous avons également mis en oeuvre des techniques expérimentales de filtrage du mode transverse du laser, par diaphragme intra-cavité et par filtrage spatial du faisceau à l'extérieur du laser. Ceci nous a amené à une définition des contraintes sur la source laser pour notre application et à la réalisation d'une étude comparative des biais dans le faisceau du laser à modes bloqués de la Station Laser Ultra-Mobile [BOCK, 95a]. Les essais ont été effectués depuis le laboratoire, sur deux rétro-rélecteurs placés à 92 m et 106 m du laser. La distance relative a été estimée par la méthode d'intercorrélation sur un ensemble de 7 séquences de 100 mesures. Nous avons noté, pour la distance relative, des dispersions de 3,3 à 10 mm sur les différentes séquences et une fluctuation de +/-1,5 mm des valeurs moyennes (sur 100 mesures) [BOCK, 95a]. L'absence de biais significatif dans ce laser a validé son utilisation dans notre système de télémétrie, validant ainsi expérimentalement l'instrumentation de la couche 2.

L'étape suivante était donc de caractériser les mesures et le traitement des informations GPS, ainsi que l'attribution des réflecteurs aux échos détectés, dans le cas d'un nombre de réflecteurs supérieur à deux (couche 3). Dans ce but, nous avons réalisé une première expérimentation sur un site déjà équipé de rétro-rélecteurs (Saint-Etienne de Tinée).

### Première expérimentation terrestre : Saint-Etienne de Tinée

Le glissement de terrain de La Clapière, situé sur la rive gauche de la Tinée, à un kilomètre en aval de Saint-Etienne de Tinée (Alpes Maritimes) est actif depuis une dizaine d'années et s'étend sur une superficie de 100 ha et 700 mètres de dénivelée. La surveillance topométrique de ce terrain est assurée par le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) - Méditerranée depuis 1977. Un système automatique a été installé en 1991 composé de deux stations de mesures équipées chacune d'un théodolite motorisé Wild TM 3000 D et d'un distancemètre Wild DI 3000 et d'une cinquantaine de rétro-réfecteurs optiques de type coin de cube en verre répartis sur le terrain.

L'expérimentation a été réalisée depuis une petite route à flanc de montagne, en face du glissement de terrain, du 28/08/95 au 02/09/95. Nous avons installé le système de télémétrie à bord d'un véhicule utilitaire, alimenté par un groupe électrogène. Mais la visibilité réduite nous a contraint à faire des points fixes plutôt qu'un cheminement. Les données acquises ont permis d'évaluer la précision instrumentale à des distances comprises entre 400 et 1 400 mètres. La figure B.2.2.4 présente une trace d'oscilloscope où apparaissent, après une forte rétrodiffusion au départ, des échos mesurés sur environ 600 mètres de profondeur.

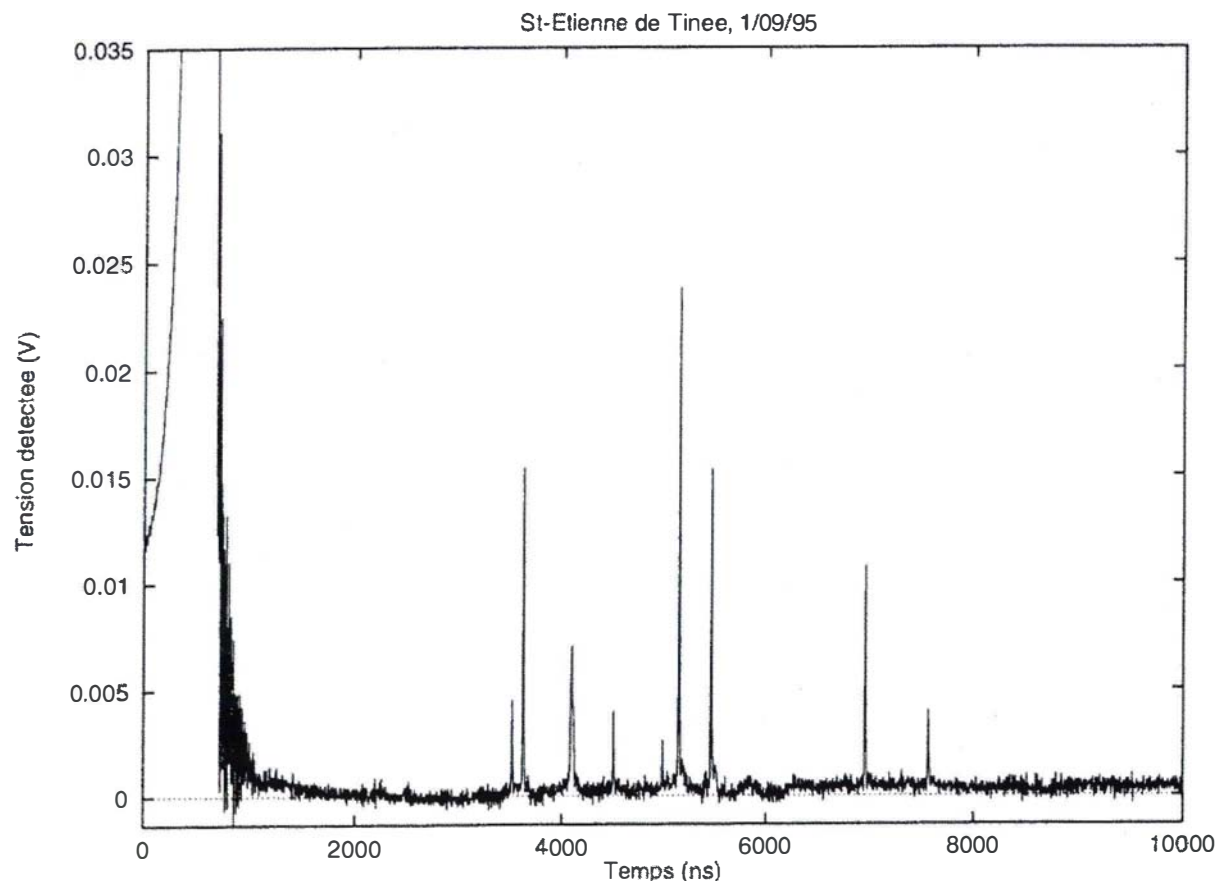


figure B.2.2.4 : exemple de signal échantillonné par l'oscilloscope

La dispersion des distances relatives mesurées est d'environ 8 cm en monocoup (un écart-type), c'est-à-dire 5,6 cm sur une distance simple en monocoup [BOCK, 95b]. Cette dispersion élevée est due au rapport signal-sur-bruit relativement faible, comme cela est visible sur la figure B.2.2.5, où sont représentés la dispersion des mesures et l'écart-type théorique moyen (calculé à partir des amplitudes des échos et du spectre du bruit mesuré dans la trace). Ces mesures ne seraient donc pas susceptibles de produire, après optimisation, une précision du millimètre sur les positions des réflecteurs. Mais le volume de données acquis lors de cette expérimentation ne nous a pas permis de tester cette phase du traitement (couche 5).

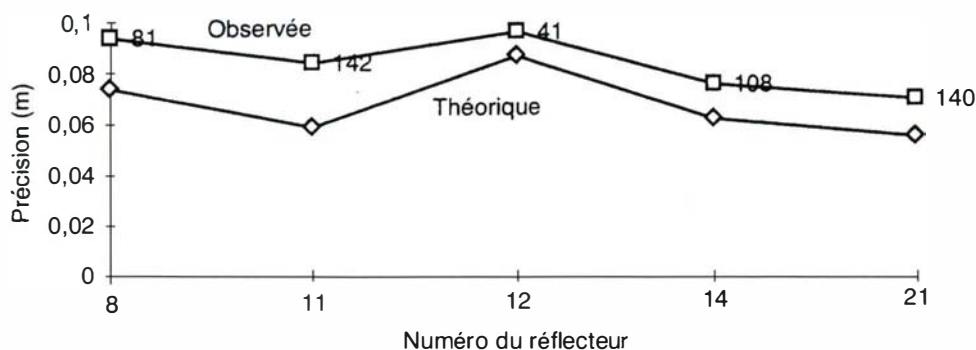


figure B.2.2.5 : dispersion des mesures de distances sur plusieurs réflecteurs et précision théorique

Toutefois, nous avons pu valider le traitement des données GPS ainsi que l'attribution des réflecteurs aux échos détectés. De même, nous avons vérifié le fonctionnement du prototype dans des conditions de terrain, en particulier la synchronisation entre GPS et mesures laser ainsi que l'échantillonnage et le stockage en temps-réel des mesures. De plus, nous voyons sur la figure B.2.2.5 que nous disposons d'un estimateur de la précision de chaque mesure individuelle (à un coefficient près). Celui-ci pourra, en particulier, servir à donner un poids aux mesures de pseudo-distances lors de l'optimisation.

### Expérimentation terrestre complète : Combs-la-Ville

La deuxième mission terrestre, a été réalisée à Combs-la-Ville, en région parisienne du 15 novembre 1995 au 13 décembre 1995 et avait pour objectif de produire des mesures pour tester la chaîne complète de traitement. Le terrain a dû être équipé spécialement : nous avons positionné un réseau de 23 points, par GPS statique et rayonnement, sur une zone de remblais de 20 mètres de haut et d'environ 1 km de long. Une petite route, parallèle au terrain et située à 500 mètres nous a servi à faire le cheminement avec le système laser embarqué à bord d'un véhicule terrestre, après avoir placé les rétro-réflecteur sur les points connus. L'exploitation de ces mesures est en cours actuellement et semble susceptible de donner des résultats encourageants.

Pour la phase d'optimisation nous allons comparer deux méthodes différentes. La première, couramment utilisée à l'I.G.N. dans les problèmes d'aérotirilatération, est la méthode des moindres carrés. Elle nécessite une adaptation aux particularités du problème (matrice creuse à inverser) qui consiste à éliminer les inconnues de position du véhicule à chaque tir du laser. La trajectoire n'est donc pas disponible en fin d'optimisation et ne permet pas de contrôle. La deuxième est une méthode de minimisation par les gradients conjugués. Elle est itérative et peut être plus longue à l'emploi mais elle résout le problème dans son ensemble (trajectoire et positions des réflecteurs). Ces deux méthodes sont validées sur des données simulées et semblent équivalentes. Il nous reste maintenant à adapter la couche 4 de traitement du signal, pour résoudre le problème des erreurs d'attribution d'échos et les biais d'estimation survenant lorsque deux échos sont très proches (les impulsions sont partiellement superposées). L'amélioration de cette phase permettra également d'évaluer statistiquement les limitations du procédé sur des données réelles, où ces phénomènes apparaissent. Cela permettra en particulier de définir les contraintes pour une mission aéroportée et une extension satellitaire.

### Conclusion

L'instrumentation du système de télémétrie laser à champ large a maintenant été validée, par simulation et de manière expérimentale, d'abord en laboratoire puis lors de deux expérimentations terrestres sur des terrains équipés de rétro-réflecteurs.

La chaîne de traitement de l'information est totalement validée sur des simulations et est sur le point de l'être sur des données réelles. L'optimisation finale sera testée sur les données de l'expérimentation à Combs-la-Ville qui imposent également une mise au point du traitement du signal.

La validation du procédé par cette expérimentation devrait alors amener à la préparation d'une mission finale, cette fois aéroportée. Toutefois l'extension à une expérimentation aéroportée nécessitera sans doute quelques adaptations, voire l'emploi d'un laser différent, en particulier moins encombrant et peut-être plus puissant.

Nous allons également étudier les conditions rendant possible une spatialisation du procédé, en particulier l'emploi d'un laser à durée d'impulsion courte sur un satellite à basse altitude (typiquement 1000 km).

## Références

- [COHEN et al 87] S.C. Cohen, J.J. Degnan, J.L. Bufton, J.B. Garvin, J.B. Abshire : The Geoscience Laser Altimetry/Ranging System, IEEE Tr. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE 25, No. 5, Sept. 1987
- [DEGNAN 93] J.J. Degnan *"Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging : A Review"*, Geodynamics Serie volume 25, Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology, 1993
- [FOURMAINTRAUX et al 94] D. Fourmaintraux, M. Flouzat, M.J. Bouteica, M. Kasser *"Improved subsidence monitoring methods"*, Society of Petroleum Engineers, paper 28095, august 1994.
- [KASSER et al 92] M. Kasser, O. Bellier, Y. Egels, C. Million, Ch. Thom et D. Fourmaintraux. *"Etude d'un procédé de télémétries laser aéroportée sur cible réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol"*. Rapport IGN SNEA(P) n°7862, Mars 1992, 90 p.
- [KHAN et al 82] W.D. Khan, J.J. D et T.S. Englar, *"The Airborne Laser Ranging System, Its Capabilities and Applications"*. NASA Technical memorandum n°8394, Sep. 1982, 27 p.
- [LUTZ et al 82] H. Lutz, W. Krause and G. Barthel : High-Precision Two-Colour Spaceborne Laser Ranging System for Monitoring Geodynamic Processes, 33rd Congress of the International Astronautical Federation, Paris, France, September 1982
- [MASSONET et al 95] D. Massonet, P. Briole and A. Arnaud : Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, Nature, Vol. 375, 15 June 1995.

## Publications

- [BOCK, 94a] O. Bock *"Caractérisation du système de télémétrie laser"*, rapport interne au LOEMI, 37 pages, Avril 1994.
- [BOCK, 94b] O. Bock *"Propriétés du faisceau laser dans le système de télémétrie"*, Rapport interne au LOEMI, 32 pages, Août 1994.
- [BOCK, 95a] O. Bock *"Développement d'un procédé de télémétrie LASER aéroportée à champ large "*, Bulletin d'Information de l'I.G.N. 1995.
- [BOCK et al, 95] O. Bock, C. Thom, M. Kasser, D. Fourmaintraux : *"Development of a new airborne laser subsidence measurement system, aiming at mm-accuracy"*, Fifth International Symposium on Land Subsidence (FISOLS), La Haye, Pays-Bas, 16-20 octobre 1995.
- [BOCK, 95b] O. Bock *"Compte rendu de l'expérimentation à Saint-Etienne de Tinée"*, rapport interne au LOEMI, 17 pages, novembre 1995.



## B.2.3. Etude par simulation de prises de vue spatiales de la précision photogrammétrique d'un capteur à balayage à haute résolution

par Mohammed Habib et Philippe Hottier (ENSG)

### Introduction

Le problème posé était d'étudier de façon exhaustive la précision qu'on pouvait espérer obtenir à partir de l'exploitation d'un couple de scènes obtenues dans différentes configurations de prise de vue (essentiellement inclinaison des axes de vue et résolution du capteur) et pour différentes sortes de relief tant par corrélation visuelle que par corrélation automatique.

Les essais ont porté prioritairement sur le cas d'une résolution de 5m et celui d'une prise de vue stéréoscopique avant-arrière et non pas latérale (mais cette considération n'influe pas a priori sur la précision intrinsèque qu'on peut espérer obtenir).

La méthode utilisée est originale en ce sens que les images sont entièrement créées par simulation à partir d'un relief revêtu d'une radiométrie terrestre ; en fait le logiciel simule effectivement le déplacement de la barrette sur sa trajectoire, chaque récepteur enregistrant pendant un laps de temps donné (par exemple 0,75 ms) les radiométries lui parvenant du sol.

Précisons un peu: pour une région donnée on part d'un MNT qui constitue la référence; ce MNT est équipé de la radiométrie afférente, celle-ci ayant été scannée avec un pas suffisamment fin (par exemple 1m) sur un cliché aérien à grande échelle (par exemple au 1 : 20 000); ceci se fait simplement en faisant coïncider la zone scannée avec l'emprise du MNT.

C'est à partir de ce relief qu'il s'agit à présent de créer deux images satellitaires; on utilise pour cela les outils développés par *Al-Battah* pour modéliser les problèmes posés par une géométrie de type Spot; un premier logiciel a été créé qui permet de calculer tous les 0,75 ms (pour une résolution de 5 m) les traces des récepteurs sur la surface du MNT; on calcule alors par convolution discrète, moyennant un rééchantillonnage préalable et en tenant compte de la pente la radiométrie reçue par chaque récepteur. On obtient ainsi une matrice de radiométries qui est l'image cherchée.

L'avantage est que tous les cas de figure peuvent en principe être explorés; on peut même simuler l'influence de la variation des paramètres d'attitude (cela n'a pas encore été fait..). Attirons cependant l'attention sur deux points : seules des images de petite taille (emprise inférieure à 2 km<sup>2</sup> ont été créées et étudiées (mais le problème de la précision ne dépend pas en principe de la taille de l'image); et surtout aucun sur-sol n'a été créé : il s'agit de reliefs *absolument lisses*.

Il faut dire aussi quelques mots de la façon dont a été géré le relief: il ne s'agit nullement d'un ensemble discret de points mais d'un ensemble de bicubiques définies sur une grille plane comportant  $n$  carreaux en  $x$  et  $m$  en  $y$ , à raison d'une bicubique par carreau; le MNT est précisément défini par la donnée en chaque noeud de 4 nombres : l'altitude, ses dérivées premières en  $x$  et en  $y$  et sa dérivée seconde croisée; tous les éléments intéressants, contours de carreaux sur le MNT, arcs de courbe de niveau sont systématiquement rapportés au carreau et modélisés en arcs de Bézier ce qui offre la possibilité de zoom et donne des moyens simples d'utiliser des types de projection très différents; tous les dessins et tous les calculs exploitant les résultats de la restitution photogrammétrique sont issus d'un même logiciel créé lui aussi dans le cadre de cette recherche; il a paru important en effet de pouvoir observer dans des conditions visuelles impeccables les effets de certains paramètres.

## Corrélation visuelle et corrélation automatique

Il a fallu d'autre part créer sur PC les outils permettant de corréler des points homologues et de calculer les coordonnées xyz du point correspondant. On se doute que ceci a demandé une grosse quantité de travail.

Le premier outil créé permet de corréler *visuellement* sur un écran de PC où figurent côte à côte les deux images, deux points homologues; on calcule alors en utilisant les principes posés dans la thèse d'Al Battah leurs coordonnées xyz. C'est avec cet outil qu'ont été obtenus les premiers résultats.

Le deuxième outil met en jeu la corrélation *automatique*. La corrélation de deux points se fait par la classique méthode de l'indice de vraisemblance; mais le procédé retenu permet de se passer totalement de la technique classique du rééchantillonnage par *épipolaires* (plus exactement par quasi-épipolaires, les épipolaires n'existant pas, comme on sait, rigoureusement parlant).

Son principe est d'utiliser la notion (nous ne savons pas si l'idée est originale) de *segment de localisation*: image sur le second cliché d'une portion du rayon perspectif relatif à un pixel du premier cliché; étant donné une fenêtre centrée sur le pixel  $i_1j_1$  du premier cliché et son segment de localisation  $m_1m_2$  (quasiment vertical dans le cas d'une prise de vue avant-arrière) on cherche en déplaçant une fenêtre centrée en  $i_2j_2$  sur ce segment à maximiser l'indice de ressemblance (qui n'est autre, rappelons-le, que le coefficient de corrélation des radiométries des deux fenêtres); ceci fait il suffit de calculer l'intersection des rayons perspectifs correspondants. En fait la méthode simple dans son principe est un peu plus délicate qu'il n'y paraît: il faut se déplacer sur le segment de localisation d'un pas nettement inférieur au pixel (car la précision finale est comme on verra une fraction de pixel) et donc constamment procéder pour la fenêtre mobile à un rééchantillonnage. La corrélation se fait alors lignes par ligne de la première image.

Notre approche utilise uniquement les données de la configuration de prise de vue (on sait qu'avec des images réelles on peut, moyennant une spatio-triangulation préalable permettant d'affiner certains paramètres mal connus, réaliser une liaison sol-image impeccable; dans le cas de simulations où on maîtrise tous les paramètres la question ne se pose pas). Le segment de localisation en mode courant et dans le cas qui nous occupe est défini par les deux points du rayon d'altitude  $z_0+12m$  et  $z_0-12m$ ,  $z_0$  étant l'altitude du point précédent de la même ligne; bien entendu au départ on ne connaît aucun point et la recherche se fait pour une tranche d'altitude beaucoup plus forte.

Pour une paire d'images couvrant une zone de  $1 \text{ km}^2$  on obtient ainsi de l'ordre de 12 000 points en xyz: la tentative de corrélation est en effet faite pour tous les pixels de la première image. On compare ensuite les altitudes de ces 12 000 points aux altitudes nominales (l'altitude nominale du point corrélé xyz est le z du MNT référence) d'où une première estimation de la précision par contrôle ponctuel: l'écart moyen quadratique altimétrique des points corrélés; mais cela ne suffit pas, car le but n'est pas d'obtenir des points isolés mais un MNT; on calcule donc à partir de ces 12 000 points le MNT qui en résulte et on évalue ensuite l'écart-moyen quadratique entre les deux surfaces: il peut être beaucoup moins bon que le précédent en cas d'échec de la corrélation sur certaines parties qui donnent lieu à des trous...

### Les problèmes

Les premiers essais faits sur un relief mou étaient forts encourageants et avaient donné d'excellents résultats. Mais la situation s'est compliquée lorsqu'on a considéré des MNT beaucoup moins réguliers comme par exemple celui de *Grabasse* traversé par une gorge profonde dans le sens ouest-est, ou pire encore celui d'*Amplepuis*.

Tous ceux qui ont eu affaire à la corrélation automatique ont certainement rencontré ce genre de situation; ayant la chance ici de disposer d'échantillons exhaustifs de points, un certain nombre de remarques et de remèdes ont pu être notés.

Voici d'abord des remarques négatives:

- Deux zones dites *homologues*, définies par des matrices carrées de pixels (par exemple des matrices d'ordre 7) peuvent correspondre à des aires très différentes du simple fait de la pente; dans le cas du MNT de *Grabasse* la pente dans la gorge atteint  $25^\circ$ : qu'on songe alors au cas où les prises de vue avant et arrière correspondent à des inclinaisons de l'axe de vue de  $+30^\circ$  et  $-30^\circ$ . On essaie alors de corréler l'incorrélabile... La corrélation sera fréquemment mauvaise mais le drame c'est que l'indice de vraisemblance, lui, est... assez fréquemment fort bon.

- Il ne suffit pas en effet d'un bon indice de ressemblance pour accepter un point. Cet indice (un coefficient de corrélation est inférieur à 1: deux points peuvent être corrélés à cause d'un indice de ressemblance de 0,95 et — combien de fois ne l'avons-nous pas observé — donner lieu à une erreur de 100 m!

- Une situation très fréquente est celle-ci: la situation est excellente sur une grande partie de la ligne de pixels étudiée sur la première image: indices de ressemblance forts et erreurs faibles; tout à coup la situation se dégrade: apparaissent au hasard des indices bons et des indices médiocres (voire négatifs) et des erreurs totalement aléatoires et de grande amplitude.

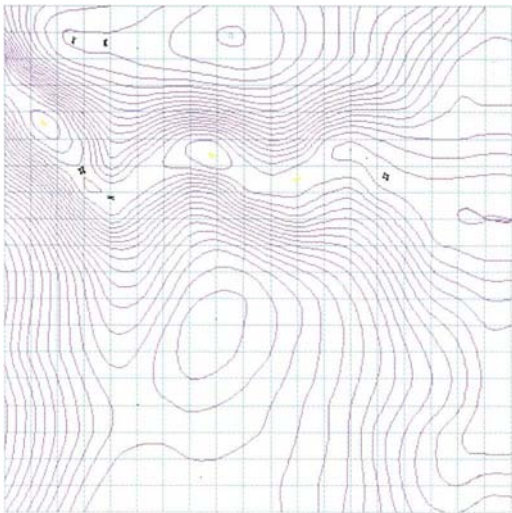
- Il est parfois conseillé de prendre au départ une fenêtre de taille assez grande (par exemple 11 sur 11 pixels) pour la raison qu'un bon indice de ressemblance est alors un meilleur garant d'une vraie corrélation; ceci nous a semblé fort discutable en zone montagneuse: l'emploi de grandes fenêtres semble au contraire parfois diminuer l'efficacité de la corrélation.

## Sites étudiés

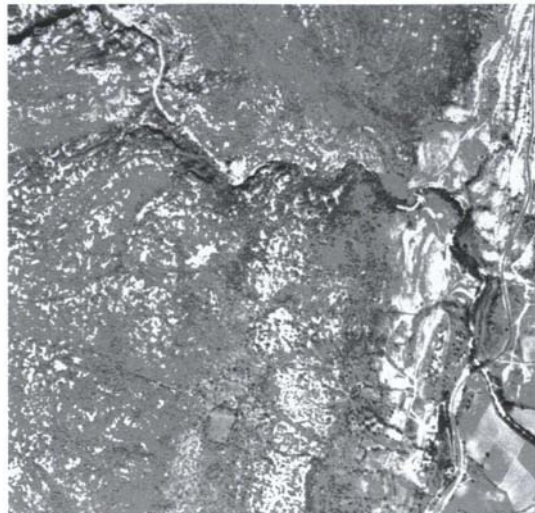
Nous citerons ici les résultats et difficultés rencontrés sur trois MNT de types très différents:

- Un MNT rigoureusement horizontal équipé de la radiométrie du MNT de Grabasse (ci-après)

- Un MNT dit Grabasse (St-Martin de Londres feuille 2742); le relief provient de la BDAIti; on observe (figures 1, 2 et 3) que cette zone d'environ 1 km<sup>2</sup> est un plateau plutôt dénudé et broussailleux, entaillé d'est en ouest d'une gorge profonde d'une centaine de m, mais assez évasée : les pentes restent inférieures à 30° ; cette gorge est parcourue par un torrent (ce que ne confirme guère la planche de courbes ci-dessous où l'on voit apparaître des cuvettes; mais ceci qui est dû à la médiocre précision de la source qui a servi à construire le MNT (la BDAIti) ne vicie en rien la méthode puisque ce MNT est choisi comme référence).



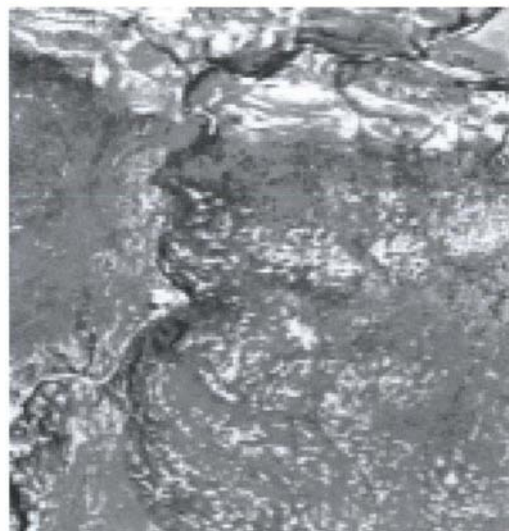
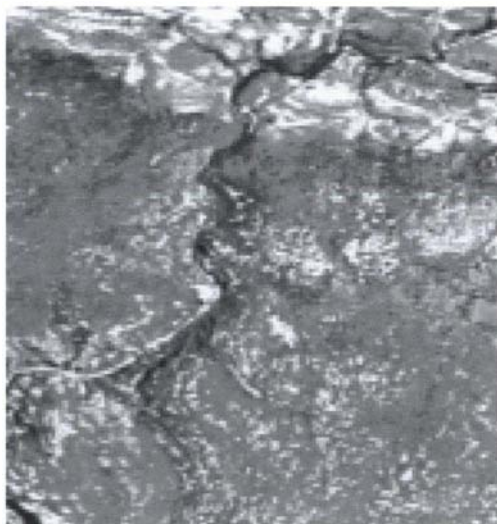
*courbes de niveau (eq. 10 m)  
du MNT référence ( 900 m de côté environ)*



*portion du cliché aérien sur lequel a été  
scannée la radiométrie équipant le MNT*

**figure B.2.3.1**

La radiométrie a été scannée sur un cliché aérien au 1 : 20 000 selon un pas équivalent à 1,27 m. Les deux imagettes spatiales obtenues sont reproduites à la figure B.2.3.2.



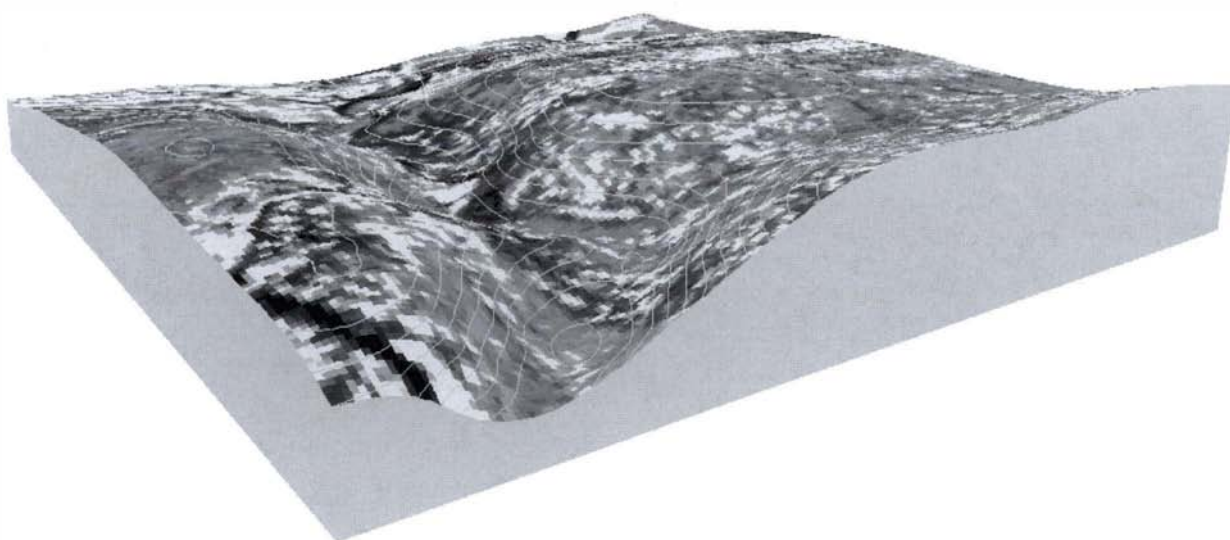
**figure B.2.3.2**

→ Nord

*images arrière (à gauche) et avant (droite) obtenues par simulation  
(inclinaisons +30° et -30°; résolution : 5 m ; 900 m de côté environ)*

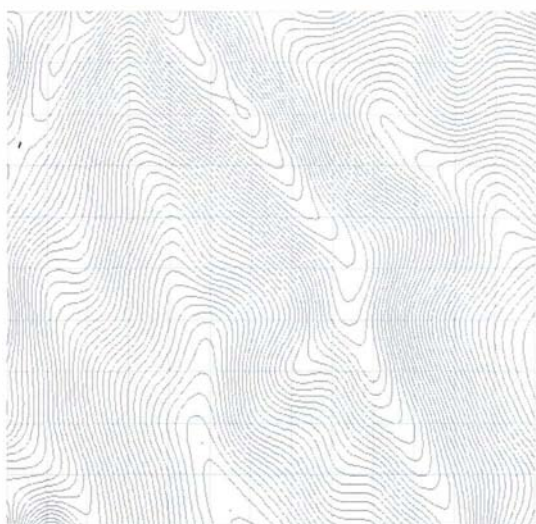


Une idée meilleure de l'aspect de la zone est donnée à la figure B.2.3.3 : une perspective revêtue de la radiométrie issue du cliché aérien mais rééchantillonnée au pas de 5 m.



**figure B.2.3.3 :** Grabasse vu du NO ; radiométrie naturelle ; équidistance 10 m (logiciel MNTA)

- un MNT dit Amplepuis (feuille 2930E, est de la France, au lieu dit Le Bois d'Oignt!) relief très montagneux avec des pentes très fortes avoisinant ou dépassant 30°; cette fois-ci le MNT référence a été calculée à partir de courbes à l'équidistance de 10 m (BD Topo); il s'agit cette fois d'une zone très boisée avec des parties très homogènes entrecoupées de clairières.



**figure B.2.3.4 :** Amplepuis logiciel MNTA

*courbes de niveau (eq. 10 m) du  
MNT référence ( 900 m de côté environ;*

*portion du cliché aérien sur lequel a été  
scannée la radiométrie équipant le MNT*

Les essais faits avec ces images ne permettait pas malheureusement d'évaluer la précision de la planimétrie par des méthodes élémentaires (les points bien identifiables sont forts rares en zone montagneuse); et très tôt il avait été décidé, concurremment avec une radiométrie naturelle d'étudier la précision à partir d'un ensemble de cibles implantées en des positions connues sur le MNT référence; il s'agit de cibles carrées de côté 15 m et noires; les images spatiales sont calculées de la même façon que pour une radiométrie naturelle. Voici l'aspect peu spectaculaire! d'une portion d'image à cibles obtenue par nos simulations (résolution 5 m) sur le MNT de Grabasse :



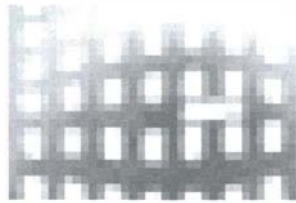


figure B.2.3.5

Ces cibles sont ensuite corrélées visuellement et les coordonnées obtenues  $x,y,z$  pour chaque centre de cible comparées aux coordonnées vraies  $X, Y, Z$ ; une deuxième façon d'estimer la précision est de calculer le MNT à partir des  $xyz$  et de le comparer au MNT référence (ceci supposant que le réseau de cibles soit suffisamment dense pour représenter correctement le MNT)

## Résultats de l'étude

### Pointés sur cible (inclinaisons $+30^\circ$ et $-30^\circ$ ; unité : m)

La surprise ici est l'étonnante homogénéité des résultats en  $z$ ; c'est aussi le fait qu'aucune difficulté sérieuse n'a été rencontrée dans la corrélation; c'est enfin le fait que le MNT de Grabasse a été très fidèlement reconstitués à partir d'un réseau régulier de quelques centaines de cibles espacées d'une distance de l'ordre de 50 m. (pour celui d'Amplepuis cela n'a pas été possible à cause de trous dus aux parties cachées).

	nombre cibles	cibles-référence	MNT-référence
<b>MNT plat</b>	280	$emqz=0,91; b=-0,49$	$ecmqz=0,53;b=0,44$
<b>Grabasse</b>	713	$emqz=1,04; b=-0,50$	$ecmqz=1,04;b=-0,05$
<b>Amplepuis</b>	600	$emqz=1,05; b=-0,60$	+++++

Dans la colonne cibles référence il s'agit effectivement de l'erreur moyenne quadratique en  $z$  (on possède le  $z$  nominal de chaque cible) et dans la colonne MNT-référence d'un écart-moyen quadratique (la moyenne quadratique des écarts en  $z$  entre le MNT reconstitué à partir des cibles et le MNT référence, évalué sur 1700 points environ);  $b$  est le biais (la moyenne des erreurs)

Nous avons ici en plus des données sur la précision planimétrique; mais celle-ci est entachée d'un biais en  $x$  et d'un biais en  $y$  assez important dont la cause exacte n'a pu être trouvée; nous donnons ci-dessous les résultats corrigés du biais mais aussi les résultats bruts. La notation  $emqxy$  désigne l'erreur moyenne quadratique planimétrique (moyenne quadratique des erreurs en  $x$  et en  $y$ ).

	nombre cibles	corrigés du biais	bruts
<b>MNT plat</b>	280	$emqxy=1,05$	$emqxy=4,4; b_x=2,3;b_y=-3,6$
<b>Grabasse</b>	713	$emqxy=0,86$	$emqxy=2,80; b_x=2,3; b_y=-0,48$
<b>Amplepuis</b>	600	$emqxy=0,92$	$emqxy=2,89; b_x=2,7; b_y=-0,40$

Ce sont très probablement les chiffres de la colonne centrale qui donne la précision planimétrique; répétons qu'il s'agit là de pointés *visuels* (ce qui explique peut-être la disparité des chiffres).

En définitive sur des points *bien identifiables* on peut donc espérer pour des inclinaisons  $+$  et  $-30^\circ$  et une résolution de 5 m une  $emq$  planimétrique et une  $emq$  altimétrique voisine du mètre.

## Radiométries naturelles

*MNT plat* (équipé de la radiométrie de Grabasse; inclinaisons + et -30°) : aucune difficulté n'a été rencontrée ; *aucun point n'a été éliminé*. Le résultat est très proche de celui constaté sur pointé sur cible.

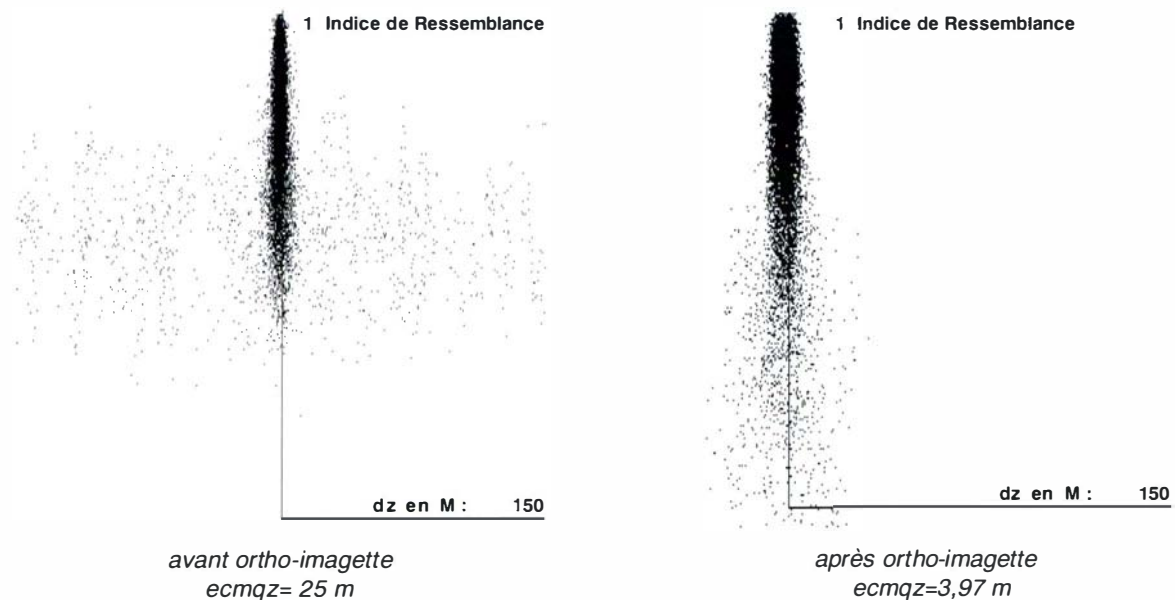
	nombre points	z Corrélé-zRef	MNT-MNTRef
<b>MNT plat</b>	6557	ecmqz=0,80; b=0,60	ecmqz=0,76; b=0,60

*MNT de Grabasse; la méthode des ortho-imagettes*. Dans ce cas il a été impossible de garder l'ensemble des points corrélés (plus de 7805): l'ecmqz évaluée sur l'ensemble des points valant 25 m!. C'est évidemment la présence de la gorge est-ouest qui cause difficulté.

Une parade très efficace a été la méthode des ortho-imagettes; le principe de cette méthode est le suivant :

- on calcule d'abord en ne retenant que les points d'indice de ressemblance >70% un premier MNT approché
- on connaît désormais une valeur approchée de la pente en chaque point; on reprend alors la corrélation des images en corrigeant localement les distorsions géométriques de l'image dues à la pente et aux inclinaisons de prise de vue; plus précisément étant donné un couple de pixels approximativement homologues  $i_1j_1$  et  $i_2j_2$  et les coordonnées approximatives du point terrain xyz, on considère un carré C de côté 60m centré en xyz et tangent au terrain; on calcule les images avant et arrière  $C_{av}$  et  $C_{ar}$  de ce rectangle (c'est à dire les coordonnées des pixels-sommets), et on détermine ensuite pour chacun de ces deux rectangles-image les paramètres de la transformation homographique permettant de passer à la projection horizontale  $C_{xy}$  du rectangle C; ceci étant la corrélation peut se faire dans le plan horizontal : pour tout couple  $i_1j_1$ , où  $i_2j_2$  est sur le segment de localisation relatif à  $i_1j_1$  on passe au plan horizontal grâce aux deux transformations et on procède à un rééchantillonnage local.

Le graphique ci-dessous met spectaculairement en évidence l'efficacité de la méthode dans le cas de Grabasse; il donne pour toutes les paires de pixels corrélés (*aucun n'a été éliminé*) le couple (l,ez) indice de ressemblance et erreur en z (unité m).



**figure B.2.3.6** : en abscisse l'erreur du point en mètres, en ordonnée son indice de ressemblance

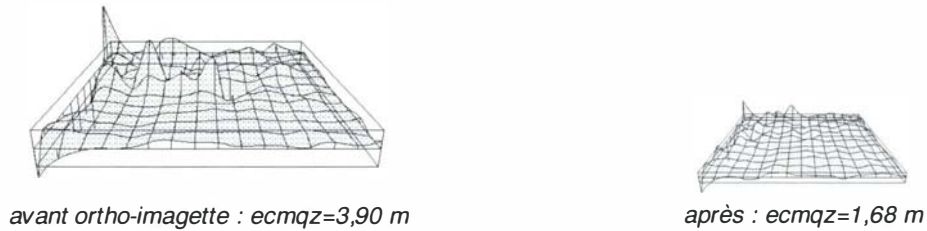
En ne retenant dans les deux cas avant et après ortho-imagettes que les points d'indice de ressemblance supérieur à 70% on a obtenu :

Grabasse	nombre points	z Corrélé-zRef	MNT-MNTRef
<b>avant ortho</b>	5877	ecmqz=8,20; b=0,67	ecmqz=3,90; b=0,44
<b>après ortho</b>	5139	ecmqz=2,64; b=0,76	ecmqz=1,68; b=0,50

NB La zone après correction est un peu moins étendue que la zone avant.

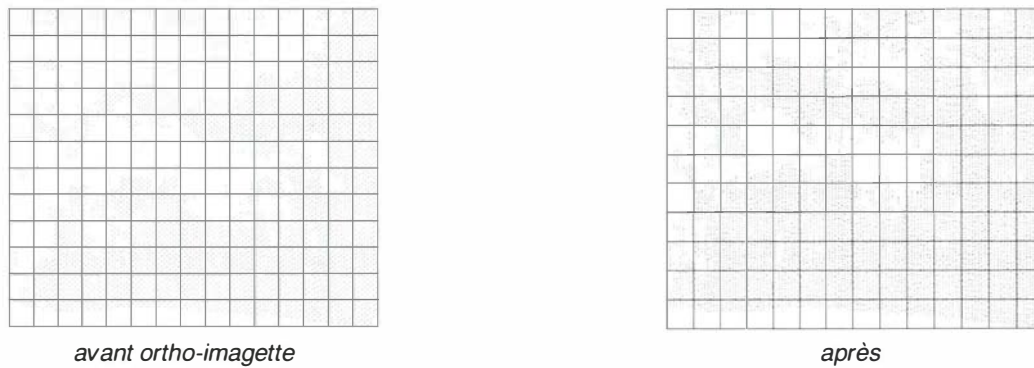
C'est naturellement le résultat obtenu lors de la reconstitution du MNT qui doit en premier retenir l'attention: on obtient après application de cette méthode une  $emqz$  de 1,63 m; cette quantité a été estimée sur 1800 écarts en z environ correspondants à des points intérieurs à la zone distants des bords de 50m au moins ( de façon évidemment à éviter de pénaliser la précision par les effets de bords).

On notera également que les  $emqz$  estimée sur les *points* sont nettement moins bonnes que celles estimées par soustraction du MNT référence au MNT reconstitué: cela est dû probablement au fait que dans les deux cas subsistent des erreurs relativement importantes mais en petit nombre et qui n'influent pas sur le rendu du MNT.



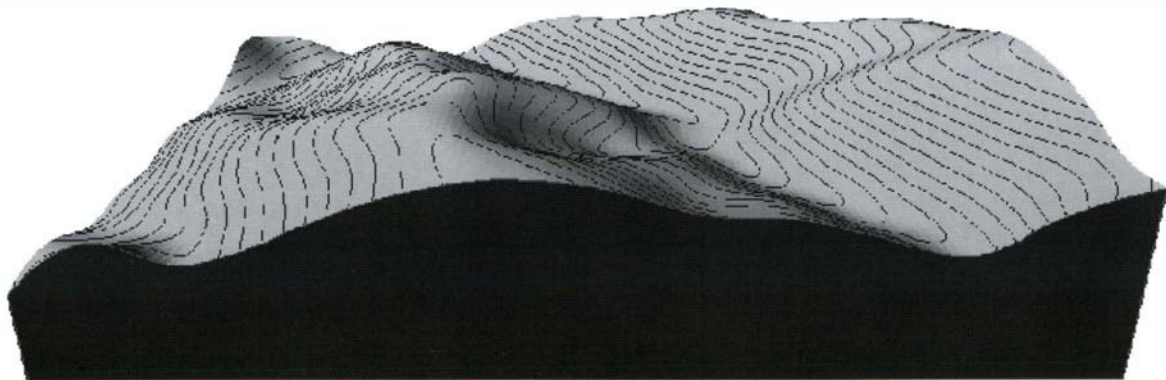
**figure B.2.3.7 :** soustraction du MNT référence au MNT reconstitué à partir des points obtenus par corrélation automatique  
(hauteur du parallélépipède circonscrit 2  $emqz$ ; largeur du carreau : 50 m;  $emqz$  estimée sur plus de 1800 écarts en z sur les carreaux intérieurs; largeur du carreau : 50 m)

On notera aussi sur les deux graphiques qui suivent la raison du succès de la méthode: il s'agit du report en xy de tous les points corrélés : on voit clairement que la densité de points corrélés (indice de ressemblance >70%) est plus forte après correction qu'avant : les zones blanches ont diminué. ( en fait la zone étudiée après correction est un peu moins importante).



**figure B.2.3.8 :** Grabasse; points obtenus par corrélation (indice de ressemblance >70%) ayant servi à reconstituer le MNT

Le MNT d'Amplepuis; les coefficients de variation : comme le montre la figure B.2.3.9 la région est difficile; les pentes atteignent, voire dépassent parfois 30° et les parties cachés sont beaucoup plus importantes qu'à Grabasse.



**figure B.2.3.9 :** Amplepuis; la zone étudiée (ég. : 5 m; logiciel MNTA)

Les résultats ont commencé par être très décevants; le tableau suivant est éloquent.

Amplepuis	points	z Corrélé-zRef	MNT-MNTRef
avant ortho	7099	ecmqz=43m; b=-6,07	ecmqz=20,79; b=2,72

indice de ressemblance >70%

Ici appliquée sans autres précautions la méthode des ortho-imagettes échoue... Car le MNT approché est par trop médiocre.

Nous avons tenté de tenir compte dans la sélection des points à la fois de l'indice de ressemblance et de la texture; pour cela nous avons considéré pour un couple de fenêtres homologues (7 sur 7 pixels) la différence des *coefficients de variation*; Il s'agit d'une quantité assez classique en statistique: étant donné un échantillon dont la moyenne et l'écart-type empirique sont  $m$  et  $\sigma$ , le coefficient de variation est défini par:

$$C = \sigma / m$$

On voit tout de suite l'intérêt de cette quantité: comme l'indice de ressemblance le coefficient de variation est sans dimension et ne varie pas quand toutes les radiométries sont multipliées par un même facteur; et d'autre part, pour une moyenne donnée, plus il est fort plus les radiométries sont dispersées et donc, – on peut l'espérer –, plus le contraste local sera élevé; l'idée est donc de ne conserver dans la population de points à fort indice de ressemblance que ceux pour lequel les coefficients de variation sont *proches* :

$$|C_1 - C_2| < \Delta C$$

On notera par ailleurs ( figure B.2.3.10) que l'allure des histogrammes des radiométries (codées sur un octet) et des coefficient de variation peut différer étonnamment d'un site à l'autre

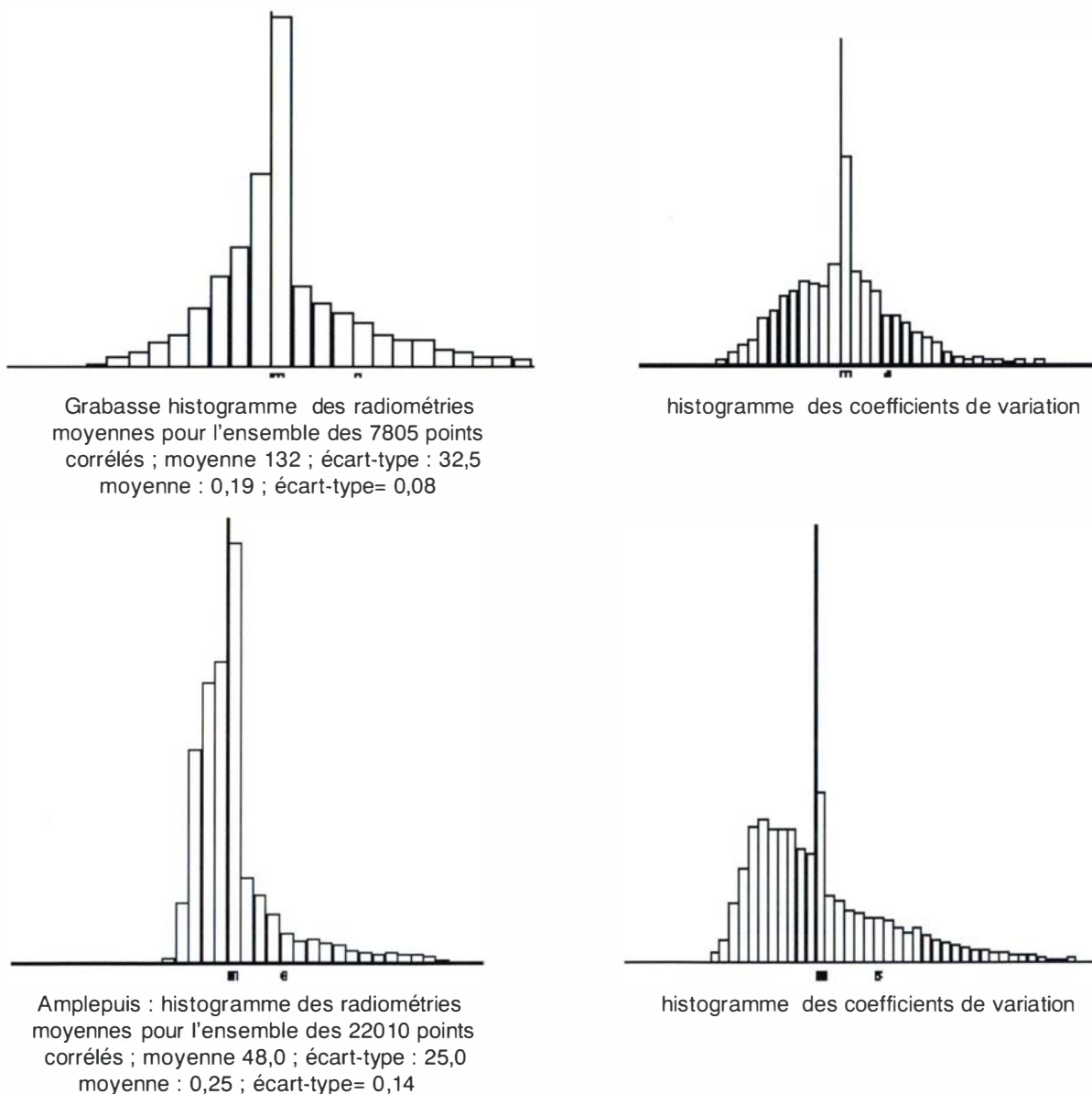


figure B.2.3.10 : radiométries et coefficients de variation à Grabasse et Amplepuis



La double condition indice de ressemblance fort et différence des coefficients de variation faible est effectivement efficace comme en témoignent sur Grabasse les essais suivants effectués *avant* l'affinement par ortho-imagettes, mais au prix d'une importante déperdition de points :

Ir	$ c_1-c_2 $	nombre points	ecmqz sur points	ecmqz MNT
>70%	-	5877	8,20	3,90
>75%	-	5272	5,20	4,64
>80%	-	4663	3,30	3,57
>70%	<0,03	3543	3,71	8,22
>70	<,002	2347	2,73	6,25
>75	<0,03	3273	1,57	5,83
>75	<0,04	4106	2,27	4,42

Il est par ailleurs intéressant de noter que l'application de cette condition après application de la méthode de l'ortho-imagette n'a rien donné.

Dans le cas d'Amplepuis (toujours pour les inclinaisons + et -30°) cette condition n'a apporté aucune amélioration *avant* ortho-imagette : les résultats restent extrêmement mauvais y compris pour le contrôle ponctuel; par contre *après* ortho-imagette la situation s'améliore; partant d'un échantillon de 15008 points donnant en contrôle ponctuel 14 m, on a observé :

Ir	$ c_1-c_2 $	nombre points	ecmqz sur points	ecmqz MNT
>70%	-	5533	4,41	11,87
>70%	<0,03	1705	3,60	48,05
>70%	<0,06	3310	3,96	11,74
>70%	<0,12	4852	4,31	12,26
>75	<0,12	3981	4,0	12,40
>60	<0,12	6446	5,71	13,67
>60	<0,06	4004	4,83	12,52

Cependant les résultats de la reconstitution du MNT sont très médiocres.

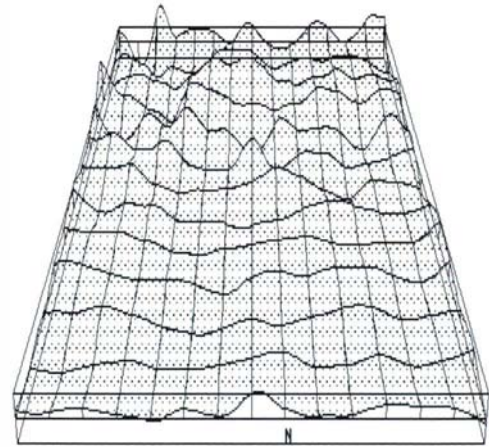
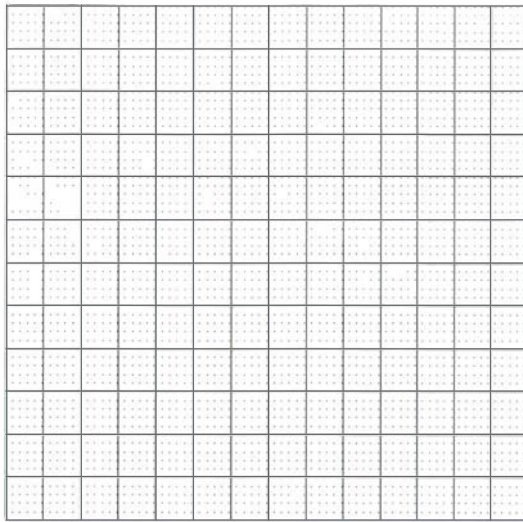
*Elimination des points aberrants sur Amplepuis.* Une dernière tentative a eu lieu : repérer les points faux et les éliminer : sur l'échantillon des points corrélés d'indice de ressemblance >70% d'effectif 7100, il y a 457 erreurs supérieures à 30 m; sur l'échantillon des points corrélés d'indice >70% et tels que  $|c_1-c_2| < 0,12$  il y en a 212 dont 186 >40 m et 171 >60 m. Lorsqu'on retire les erreurs supérieures à 30 m on observe les résultats suivants, *avant* correction ortho-imagette, soit une amélioration notable sur les points mais des résultats médiocres pour le MNT reconstitué :

Ir	$ c_1-c_2 $	nombre points	ecmqz sur points	ecmqz MNT
>70%	-	6642	3,92	43,00
>70%	<0,05	3911	3,72	16,95
>70%	<0,10	5815	3,77	6,13

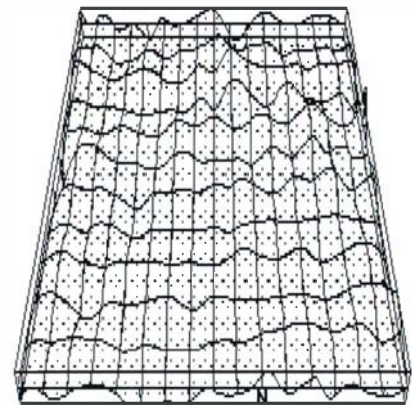
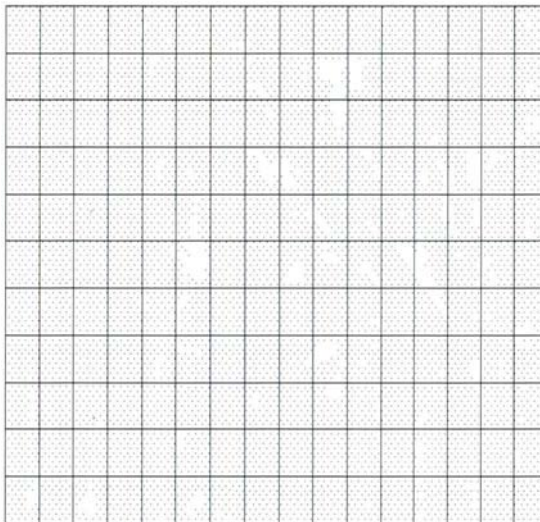
Aucune amélioration n'a été constatée en appliquant la méthode des ortho-imagettes.

### Avec une prise de vue verticale

En définitive il apparaît bien que le problème essentiel vient des parties cachées ou quasi-cachées; nous nous sommes demandés, quitte à réduire le rapport base/éloignement si on n'aurait pas avantage à utiliser un couple avec une prise de vue verticale et une autre inclinée à 20°.



*Grabasse : inclinaisons 0 et 20°; indice de ressemblance >70%; résultat (sans correction ortho-imagettes) : ecmqz=1,58 m ; biais=-0,24 m*



*Amplepuis : inclinaisons 0 et 20° ; indice de ressemblance >70% ; résultat (sans correction ortho-imagettes) : ecmqz= 2,71 m ; biais= -0,77 m*

**figure B.2.3.11**

A notre surprise les résultats sont quant à la reconstitution du MNT étonnamment bons : pour Grabasse absolument comparables à ceux obtenus avec la méthode de l'ortho-imagette (et même un peu meilleurs 1,58 m au lieu de 1,68 m) et pour Amplepuis meilleurs que tout ce que nous avons obtenu jusqu'ici : emqz=2,71 m.

## Conclusion

La méthode de simulation que nous avons mis au point permet de considérer toute la chaîne allant de la source (images et configuration de prise de vue) au MNT ; elle a été ici appliquée à un capteur spatial de type Spot avec une résolution de 5 m mais pourrait être transposée à tout type de capteur.

Partis pour étudier surtout l'influence de certains facteurs comme le rapport base/éloignement il a fallu se rendre compte à l'évidence: le problème majeur lorsqu'on cherche à reconstituer, en terrain accidenté, un MNT par corrélation automatique est celui des pentes et des parties cachées. S'il y a peu de parties cachées la méthode des ortho-imagettes s'avère très efficace et améliore considérablement la précision parce qu'elle corrige les distorsions géométriques. La considération de la différence des coefficients de variation des fenêtres homologues a aussi de l'intérêt.

Il y a en outre plusieurs conclusions pratiques :

- Il est vain de construire en zone montagneuse un MNT précis à partir de deux prises de vue inclinées même lorsqu'il s'agit d'un capteur à balayage, a fortiori lorsqu'il s'agit d'un couple de clichés aériens, donc de deux perspectives centrales. Une prise de vue du type perspective quasi-parallèle, donc réalisée à partir d'un capteur à balayage et d'axe *vertical* semble s'imposer.

- Les précisions obtenues sont presqu'inattendues: en terrain à faible relief l'écart-moyen quadratique en  $z$  est inférieur au  $m$  ; en terrain montagneux difficile il est inférieur à  $3 m$ . Or la BDTopo constituée à partir de clichés au 1: 30000 (résolution de l'ordre du  $m$ ) ne semble pas faire mieux...: en plaine l'ecmq en  $z$  est voisin du *mètre* ; quant au terrain montagneux nous citerons un seul cas: dans la zone d'Amplepuis celle justement que nous avons étudiée deux restitutions en courbes ont été faites en 1995; or les MNT reconstitués à partir de ces deux planches numérisées font apparaître un écart moyen quadratique en  $z$  de 4,47 m avec des écarts dépassant 10 m ... .

- Une répartition *régulière* des points est capitale pour reconstituer avec précision les formes; un coup d'œil sur les graphiques de répartition montre que les parties les plus discordantes correspondent aux zones vides ou à faible densité. Il n'est pas sûr qu'ici le remède comme on l'entend dire soit l'adjonction de lignes caractéristiques convenablement numérisées; une solution plus simple, à notre avis est un complètement dans les zones vides. A notre avis il faut placer en amont le problème de la précision ,qui doit être la plus homogène possible et le distinguer du problème du rendu que nous voyons plutôt en aval.

## Bibliographie

[ John R. Jensen]- Issues Involving the Creation of Digital Elevation Models and Terrain Corrected Orthoimagery Using soft-Copy Photogrammetry- Geocarto International, Vol.10, No.1, March 1995.

[ MICHEL JORDAN and JEAN - PIERRE COCQUEREZ ]- Three-Dimensional Description of Scenes Observed in Aerial Photography- Pattern Recognition, Vol. 28, No. 7, pp. 931-947, 1995.

[ F. Raye Norvelle]- Stereo Correlation: Window Shaping and DEM Corrections- Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58, No. 1, pp. 111-115, January 1992.

[ Liang-Chien Chen and Jiann-Yeou Rau ]- A Unified Solution for Digital Terrain Model and Orthoimage Generation from SPOT Stereopairs- IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 6, November 1993

[ Qi Tian and Michael N. Huhns ]- Algorithms for Subpixel Registration- Computer Vision, Graphics, and Image Processing 35, 220-233, 1986.

[ H. Le Men ]- Aspects Algorithmiques du traitement d'image en cartographie- Cours DEA CARFA, Paris 5 - Ponts et Chaussées IGN, 1995.

[ P. Julien ]- Traitement Altimétriques (Modèles Numériques de Terrain )- Cours DEA SIG 1994 (Ecole Nationale des Sciences Géographiques ), 1994.

[ Albattah Mahmoud ]- Modélisation Géométrique et Stéréorestitution Photogrammétrique des Images Spatiales Type SPOT- These de Doctorat de l'Université Paris VI, 1989.

[ Hottier PH. ]- Précis de Statistiques- Support de Cours à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques, 1996.

[ Hottier PH et Albattah M. ]- Modélisation de l'Imagerie SPOT et Spatiotriangulation, Une méthode de Calcul des Coordonnées\_image d'un point Sol en moins de 60 Operation Elementaires ... .

## B.3.1 Constitution d'une base de données multi-échelles

par Thomas Devogele

### Introduction

Les représentations multiples sont un des problèmes clé dans le domaine des systèmes d'information géographique (SIG) [BRUGGER et al 89]. En effet une élaboration hiérarchique, avec différents niveaux de détails, de résolution, de précision, semble être une bonne méthode de raisonnement [MARK 89]. Or les bases de données géographiques s'apparentent trop à des cartes, c'est-à-dire qu'elles ne possèdent qu'une seule représentation correspondant à une échelle donnée. Pourtant formellement, une base de données géographiques n'inclut pas la notion d'échelle ; [MÜLLER et al 95] parle plutôt, à juste titre, de *précision* (degré de détail dans les mesures), *d'exactitude* (erreur moyenne) et de *résolution* (taille du plus petit objet représentable). Il semble judicieux donc de rapprocher la détermination de ces trois notions pour une base de données géographiques à la notion d'échelle communément admise pour une carte.

Une *base de données multi-échelles* est donc une base de données géographiques permettant de représenter un même phénomène du monde réel à différents niveaux de précision, d'exactitude et de résolution. Hélas, les bases de données multi-échelles ne sont pas disponibles.

### Contexte - objectifs

En effet, les organismes producteurs de données géographiques mettent en place plusieurs base de données (BD) "indépendantes" à des échelles différentes, ceci à la fois pour des raisons de calendrier de saisie et de capacité des SIG actuels. Un des éléments techniques qui intervienne dans ce type de choix et qui conditionne les modes de mise à jour ultérieurs est le manque d'outils de généralisation automatique [MÜLLER et al 95]. En pratique, on aboutit donc à des gestions de ces bases en parallèle et largement découplées. Pourtant, pour ces *producteurs*, l'intégration de ces BD en une BD multi-échelles est un moyen d'assurer ou de contrôler la cohérence des mises à jour et à moyen terme de propager les mises à jour d'un niveau d'échelle à l'autre. De plus, l'intégration des données réalisée est aussi un moyen complémentaire de contrôler la qualité des données (actualité mais aussi exhaustivité, précision géométrique...). Enfin, une telle BD multi-échelles peut également permettre de dériver une plus grande variété de lots de données, en particulier à échelle variable (produit à façon).

Du point de vue des *utilisateurs*, différents niveaux d'abstraction sont nécessaires. Par exemple, les systèmes de navigation requièrent plusieurs représentations :

- des représentations détaillées (grande et moyenne échelles) pour aller du point de départ au réseau interurbain et de ce réseau au point d'arrivée.
- des représentations plus simples (petites échelles) pour naviguer sur le réseau interurbain, afin de ne pas noyer l'utilisateur sous les détails.

D'autres utilisations sont aussi souhaitées par les utilisateurs (zooms intelligents [TIMPF, FRANK 95], l'analyse de données multi-échelles ...)



Les recherches de l'IGN ont donc pour *objectif* de répondre à ces besoins (producteurs comme utilisateurs). Dans ce but, des travaux sur le regroupement et la manipulation d'informations à différentes échelles ont été lancés au laboratoire COGIT afin de permettre l'interopérabilité entre les bases de données classiques.

Dans cette intention, le premier travail a constitué à définir le concept de lien de correspondance [Devogele et Raynal 95]. Ce concept permet de relier les différentes représentations. Une fois ce travail effectué, un processus de conception de base de données multi-échelles à partir de base de données classiques a été élaboré.

Ce processus a été expérimenté et validé [Trevisan 95] pour des données routières à différentes échelles (la BDCARTO et Géoroute) sur la zone de Marne-la-Vallée (367 km de routes pour la BD CARTO et 991 km de routes pour Géoroute, zone avec un réseau routier dense et varié). Cette maquette a été développée sur GÉO<sub>2</sub> [Raynal et al. 95] [DAVID et al 93], pour trois classes d'objets (Route, Tronçon routier et Noeud routier). Par souci de lisibilité, on adoptera l'acronyme BDC pour désigner la BDCARTO et l'acronyme G pour désigner GÉOROUTE.

Cet article relatara donc le processus de constitution d'une base de données multi-échelles : l'intégration de schémas puis l'appariement des données nécessaire à l'élaboration de la maquette. Au préalable le concept de lien de correspondance va être présenté.

## Les liens de correspondance

Les *liens de correspondance* relient deux ensembles d'éléments représentant le même phénomène du monde réel et portent la séquence des opérations multi-échelles nécessaire pour passer d'une représentation à une autre. Ces éléments peuvent faire partie des schémas (types ou classes) ou être des instances de ces schémas (objets).

Un lien de correspondance est donc un n-uplet de type :

- lien de correspondance : tuple (ensemble 1 : set (élément représentation 1), ensemble 2 : set (élément représentation 2), opérations multi-échelles : list (opération multi-échelles))

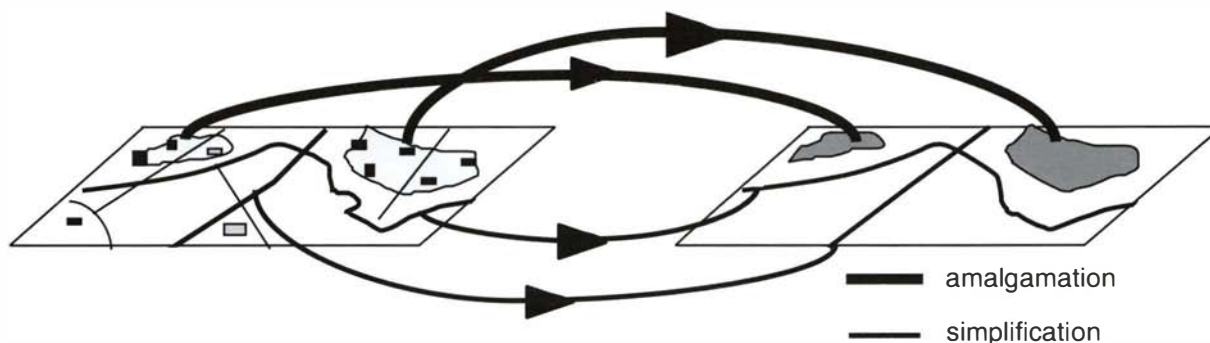


figure B.3.1.1 : exemple de représentations avec des liens de correspondance

Par exemple, pour les objets de la figure B.3.1.1, il existe :

- deux liens de correspondance entre un ensemble d'habitations et une zone d'habitation avec comme opération multi-échelles une amalgamation.
- deux liens de correspondance entre un tronçon de route et un autre tronçon de route avec comme opération multi-échelles une simplification.

On peut remarquer au passage que certains éléments n'ont pas de correspondant du fait de leur suppression dans une représentation moins détaillée.

Une fois ce concept défini, le processus de constitution peut être décrit.

## Intégration de schémas

La première étape est l'intégration de schémas qui permet de définir un schéma commun. L'intégration de schémas est indispensable car elle permet l'interopérabilité entre les bases de données existantes, en fournissant un langage d'accès multi-bases et une description intégrée des données [PARENT, SPACCAPIETRA 96]. Cette phase s'inspire des travaux antérieurs de [SPACCAPIETRA et al 92] [DUPONT 94] qui utilisent une intégration assertionnelle en deux phases : déclarations des correspondances puis résolution des conflits pour fusionner les schémas.

### Déclaration des correspondances entre types et entre classes

La déclaration des correspondances sert à révéler les différences de modélisation, elle s'appuie ici sur le modèle des liens de correspondance. Deux sorte de liens sont décrits :

Les *liens de correspondance entre types*. Ils décrivent les différences de "structure" entre deux types. Ces différences sont décrites par les opérations multi-échelles. Pour la maquette, les différences de structure rencontrées entre deux types en correspondance sont du genre "transformation d'un type n-uplet en un type chaîne de caractères", "changement pour la liste des valeurs autorisées d'un type énuméré", "suppression d'attribut", ... Ces modifications sont empruntées à la théorie des bases de données et plus précisément aux opérations d'intégration ou d'évolution de schémas (définies dans [MOTRO 87] [SCHERRER et al 93] [SCHOLL, TRESCH 93]).

Les *liens de correspondance entre les classes* servent à décrire les correspondances entre les collections d'instances, c'est-à-dire indiquer qu'une instance de classe 1 dans le schéma 1 correspond à une instance de classe 2 dans le schéma 2. Des correspondances plus complexes sont aussi possibles. Par exemple, pour la maquette, les classes *Noeud Routier* ne se correspondent pas exactement :

- une instance de la classe *noeud routiers* de G correspond à 0 ou 1 instance de la classe *noeud routiers* de BDC (selon qu'il est supprimé ou conservé).

- une instance de la classe *noeud routiers* de BDC peut correspondre à un carrefour complexe dans G (figure B.3.1.4.1.1), lequel est composé de *noeuds routiers* et de *tronçons* de G. En effet, du fait du changement d'échelle, certains *tronçons* et *noeuds routiers* sont supprimés ou sont symbolisés en un ensemble plus restreint d'objets.

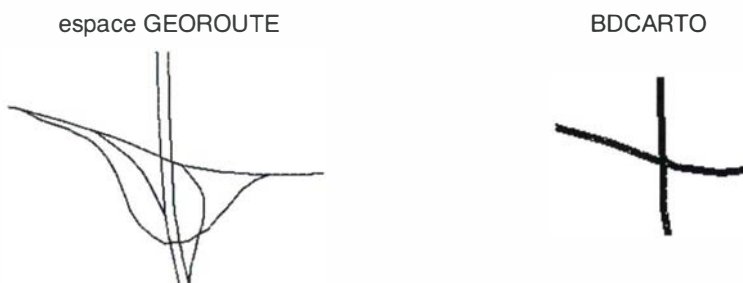


figure B.3.1.2

le même carrefour dans G et dans BDC

## Fusion des schémas

La fusion de schéma est la deuxième phase de l'intégration; elle unifie les types et les classes en correspondance pour former le schéma intégré de la base multi-échelles, c'est-à-dire qu'elle détermine pour chaque sorte de lien de correspondance, la technique d'intégration la mieux appropriée. Dans notre cas, cette technique doit fournir un schéma *sans perte d'information*, ni valeurs nulles et doit permettre de *relier les objets* issus des différentes représentations d'origine le plus précisément possible.

Donc pour la maquette, pour chaque sorte de lien de correspondance (entre types ou entre classes) une technique d'intégration a été choisie. Le schéma suivant a été obtenu :

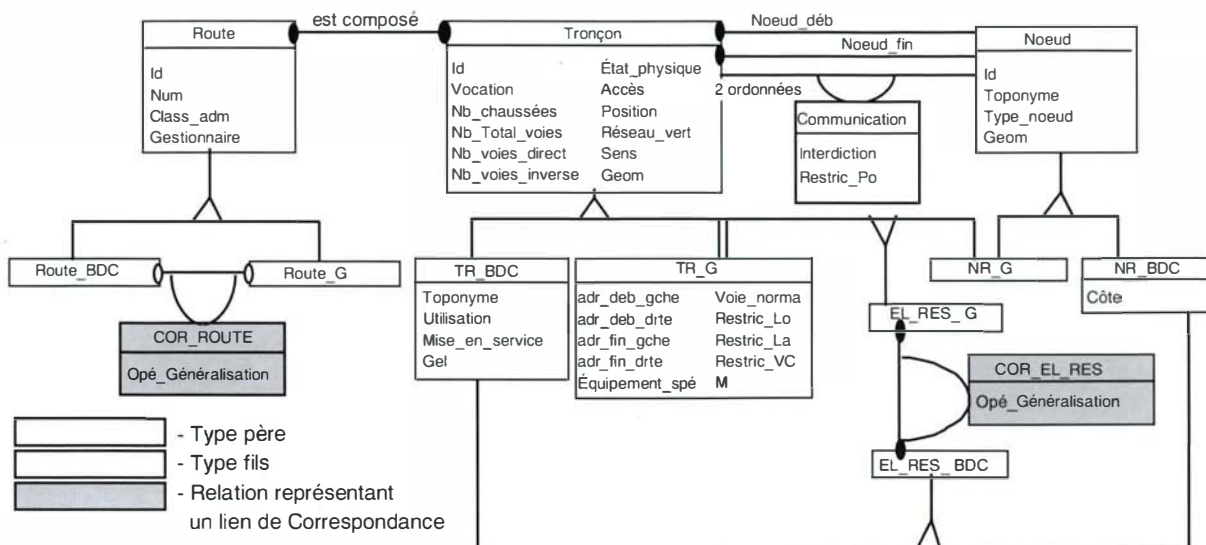


figure B.3.1.3 : le schéma multi-échelles obtenu (Modélisation OMT [Rumbaugh et al 91])

A l'aide de ce schéma, les deux représentations sont regroupées dans une même base de données. Les données issues de BDC et de G ont donc été converties au nouveau format de la BD multi-échelles, et migrées avec leur index spatial. La base de données multi-échelles supporte alors deux représentations intégrées dans un schéma unique, mais les objets homologues ne sont pas appariés.

## Appariement des données

L'appariement des données, consiste à relier les objets homologues (représentant le même phénomène réel) entre eux. Ce processus d'appariement génère donc les liens de correspondance entre objets en utilisant des informations sémantiques, topologiques et géométriques.

- L'appariement *sémantique* s'attache à mettre en correspondance des objets grâce à leurs attributs sémantiques (clefs d'identification). Les objets sont appariés grâce aux valeurs de ces attributs.

- L'appariement *topologique* utilise les relations (de composition ou topologique) entre les différents objets pour appairer les données. Si deux relations sont en correspondance, alors cette correspondance doit permettre de trouver les objets homologues unis par cette relation.

- L'appariement *géométrique* consiste à appairer les données géographiques par leur localisation en se dotant d'une mesure de distance entre objets. D'autres caractéristiques géométriques, comme la direction [GABAY, DOYTSHER 94] ont été proposées pour appairer ces données.

Ces trois sortes d'informations sont utilisées pour combler les lacunes des appariements simplement géométriques présentés dans [RAYNAL, STRICHER 94] [EDWARDS 94] [GABAY, DOYTSHER 94]. Ces trois types d'appariement ont été nécessaires pour la maquette. De plus l'ordre dans lequel ils sont enclenchés conditionne le processus (les données routières formant un réseau, de nombreuses relations existent). La figure B.3.1.5 illustre les trois étapes successives ont été mises en œuvre :

*Appariement des routes* : Cet algorithme repose sur des informations sémantiques (construction d'une clé d'identification à partir des attributs *numéro* et *gestionnaire* ) et génère des couples d'objets (*Route\_BDC*, *Route\_G*).

*Appariement des nœuds* : Cette procédure est plus complexe, car elle repose sur des informations topologique et géométrique.

En effet, en premier lieu, on détermine une zone de recherche (l'intersection d'un cercle et du diagramme de Voronoï [YAP 87]) autour de chaque nœud BDC (voir figure B.3.1.4), ceci afin de sélectionner les nœuds G contenus dans cette zone.

Puis, en utilisant la relation topologique entre nœud routier et tronçon, on forme des groupes connexes (figure B.3.1.4 : 4 groupes connexes),

On choisit ensuite celui pour lequel les tronçons sortants (tronçons reliés au groupe) et les tronçons composants (tronçons appartenant au groupe) de G s'apparient avec les tronçons sortants du nœud BDC. Dans la figure B.3.1.4, on constate que seul le groupe 1 s'apparie avec le nœud BDC).

Un tel algorithme est appliqué pour tous les nœuds routiers de BDC et génère des couples  $(NR\_BDC, \{NR\_G, TR\_G\})$ .

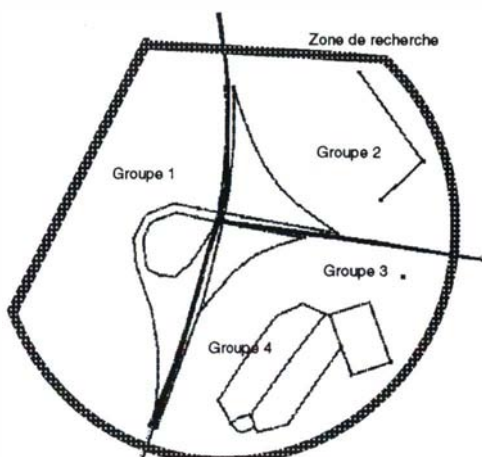


figure B.3.1.4 : exemple de groupes connexes

**Appariement des tronçons :** [RAYNAL, STRICHER 94] : Désormais, les tronçons BDC doivent être appariés avec les tronçons G (les tronçons G appariés avec un nœud BDC sont retirés au préalable). Cet appariement est réalisé en deux phases. En premier lieu, les tronçons appartenant à des routes appariées sont traités route par route. Puis les tronçons restants sont appariés. L'appariement géométrique des tronçons est réalisé à l'aide de la mesure de la distance de Hausdorff. On obtient alors trois types de tronçons G :

- Tronçon apparié : Seul 1 tronçon BDC est à une distance inférieure au seuil d'appariement.
- Tronçon litigieux : Plusieurs tronçons BDC sont à une distance inférieure au seuil d'appariement, et on ne peut choisir le tronçon homologue uniquement avec la distance.
- Tronçon non apparié : Aucun tronçon BDC n'est à une distance inférieure au seuil d'appariement : soit ce tronçon n'a pas de correspondant ; soit ce tronçon a un correspondant à une distance supérieure au seuil d'appariement géométrique.

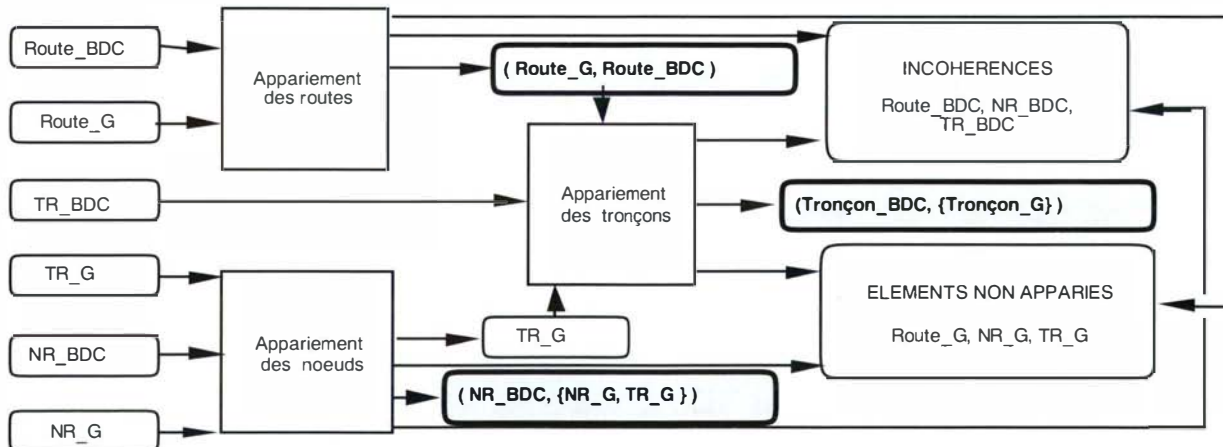


figure B.3.1.5 : processus d'appariement du prototype

Bien que les deux derniers algorithmes d'appariement ne soient pas optimaux (on peut y intégrer certainement plus d'informations sémantiques), on peut avancer qu'un processus d'appariement satisfaisant a pu être mis en place et achevé sur des jeux de données réels [TREVISAN 95].



## Conclusion

Un processus de constitution de base de données multi-échelles a donc été décrit. Il s'appuie sur les liens de correspondance et il est en deux étapes : intégration de schémas puis appariement des données.

L'application de ce processus aux données routières de BDC et G a démontré qu'il était possible de réaliser des bases de données multi-échelles. Ce processus peut donc maintenant être généralisé avec plusieurs bases de données en utilisant les mêmes méthodes. Malgré tout, il faut encore avancer sur plusieurs points :

- optimiser et approfondir l'algorithme d'appariement,
- récupérer et stocker les opérations multi-échelles
- engager une réflexion plus générale sur l'intégration de bases de données géographiques issues d'un processus de généralisation.

Finalement, un système de base de données (central, réparti, fédéré) devra être retenu. Le choix de ce système se fera en fonction des utilisations de la base de données multi-échelles.

## Références

- [BRUGGER et al. 89] B. P. Brugger, R. Barrera A. U. Frank, K. Beard et M. Ehlers (1989) *Research Topic on Multiple Representations*, NCGIA Initiative 3 Workshop on Multiple Representations, pages 53-67, 1989.
- [CAR, FRANK 94] A. Car, A.U. Frank, *Modelling a Hierarchy of Space applied to Large Road Networks*, conférence IGIS, pages 15-24, 1994.
- [DAVID et al 93] B. David, L. Raynal, G. Schorter and V. Mansart (1993) *Why objects in a geographical DBMS ?*, *Advances in Spatial Databases*, LNCS n°692, pp 264-276, 1993.
- [DUPONT 94] Y. Dupont *Resolving Fragmentation Conflicts in Schema Integration*, 13th Int. Conf. on The Entity Relationship Approach, 1994.
- [EDWARDS 94] G. Edwards *Characterising and maintaining polygons with fuzzy boundaries in geographic information systems*, *Spatial Data Handling*, Taylor&Francis, pages 223-239, 1994.
- [MARK 89] D. Mark *Multiple views of multiple representations*, NCGIA Initiative 3 Workshop on Multiple Representations, pages 68-71, 1989.
- [MOTRO 87] A. Motro *Superviews; Virtual Integration of Multiple Databases*, *IEEE Transactions on Software Engineering* 11 (7), pages 785-798, 1987.
- [MULLER et al 95] J.C. Müller, J.P. Lagrange, R. Weibel et F. Salgé *Generalisation : state of the art and issues*, *GIS and GENERALISATION*, (Ed.), Taylor & Francis, pages 3-17, 1995.
- [PARENT, SPACCAPIETRA 96] C. Parent et S. Spaccapietra *Intégration de bases de données : Panorama des problèmes et des approches*, *Ingénierie des Systèmes d'Informations*, Hermès, à paraître.
- [RAYNAL et al 95] L. Raynal, B. David et G. Schorter *Building an OOGIS prototype: experiments with GEO2*, *Auto Carto 12* pages 137-146, 1995.
- [RAYNAL, STRICHER 94] L. Raynal et N. Stricher *Base de données multi-échelles : Association géométrique des tronçons de route de la BD CARTO et de la BD TOPO*, *EGIS*, pages 300-307, 1994.
- [RUMBAUGH et al 91] J. Rumbaugh, M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy et W.Lorensen *Object-Oriented modeling and design*, Prentice Hall (Ed.), Englewood Cliffs, 1991.
- [SCHERRER et al 93] S. Scherrer, A. Geppert et K. Dittrich *Schema Evolution in NO 2*, rapport technique de l'Institut für Informatik der Universität Zurich, 1993.
- [SCHOLL, TRESCH 93] M.H. Scholl et M. Tresch *Schema Transformation without database reorganisation*, *ACM SIGMOD Record*, (22 ; 1), 1993.
- [SPACCAPIETRA et al 92] Spaccapietra S., Parent C. et Dupont Y., *Model-Independent Assertions for Integration of Heterogeneous Schemas*, *Very Large DataBases Journal*, 1(1), pages 81-126, 1992.
- [TIMPF, FRANK 95] S. Timpf et U. Frank *A Multi-scale DAG for cartographic objects*, *Auto Carto 12*, pages 157-163, 1995.
- [YAP 87] C.K. Yap *An O(n log n) Algorithm for the Voronoi Diagram of a set of simple Curve Segments*, *Discrete Comp. Geom.* 2, pages 365-393, 1987.

## Publications

- [DEVOGELE, RAYNAL 95] T. Devogele et L. Raynal. *Intégration de Base de Données à différentes échelles : les liens de correspondance*, 2 Journées Cassini, Marseille, 1995.
- [DEVOGELE, RAYNAL 96] T. Devogele et L. Raynal. *Modelling a multi-scale database with scale-transition relation ships*, Samos'96, Grèce, à paraître.
- [DEVOGELE et al 96] T. Devogele, J. Trevisan et L. Raynal *Designing and Producing a Multi-Scale Database from Mono-Scale Databases*, *Geoinformatic'96*, West Palm Beach, à paraître.
- [TREVISAN 95] J. Trevisan *Conception d'une BD Multi-échelles*, rapport de projet pluri-disciplinaire de l'ENSG, 1995.

## B.3.2 Plate-forme de généralisation PlaGe et application à la caricature

par François Lecordix et Corinne Plazanet

### Introduction

La généralisation cartographique est un problème éminemment visuel : du fait de la réduction d'échelle, on dispose d'un espace plus petit pour représenter l'information initiale. Ne pouvant simultanément visualiser la même quantité d'information et conserver une bonne lisibilité, il est nécessaire d'effectuer des opérations permettant de restituer l'information la plus pertinente. Ces opérations de généralisation s'effectuent d'une part sur les éléments pris isolément, constituant la généralisation non contextuelle, et d'autre part sur les éléments considérés dans leur environnement géographique, constituant la généralisation contextuelle. Dans les deux cas, l'influence de la symbolisation, et donc de la visualisation, est prépondérante.

Pour effectuer des recherches en généralisation, il est donc indispensable de s'appuyer sur un outil de visualisation. Dans le cadre des recherches en généralisation cartographique non contextuelle, visant à fournir d'abord des outils d'assistance à la généralisation, puis une automatisation du processus, le laboratoire COGIT a choisi de développer une plate-forme de généralisation, appelée PlaGe, offrant des fonctions de SIG et des possibilités de visualisation proche de la symbolisation finale.

Cet article a pour but de présenter d'abord les objectifs qui ont guidé le développement de cette plate-forme, puis de présenter les modules de base de l'interface graphique et l'intégration dans PlaGe d'algorithmes existants dans la littérature. Ensuite deux applications pratiques de cette plate-forme seront présentées plus en détail : le développement de nouveaux algorithmes liés à la caricature des lignes et l'approche pour l'automatisation.

### Objectifs

Les logiciels du marché permettant de visualiser et de manipuler des données géographiques peuvent être classés en deux catégories :

- ceux privilégiant les notions de SIG offrant généralement des notions topologiques mais pauvres en affichage cartographique ;
- ceux privilégiant les notions de rédaction offrant des symbolisations très proches de celle obtenue sur une carte, mais disposant de structures de données insuffisantes.

Or, en regard de l'ensemble des problèmes liés à la généralisation cartographique indiqués dans un état de l'art en généralisation [RUAS, LAGRANGE 92], il apparaît impossible d'envisager entreprendre des recherches approfondies dans ce domaine en se passant soit de la topologie, soit de la symbolisation. Lors de l'expérimentation [ROUSSEAU et al 94] effectuée au laboratoire COGIT de l'un des rares logiciels de généralisation interactive, Map Generalizer d'Intergraph, l'absence d'affichage avec symbolisation à l'échelle souhaitée s'est avérée rédhibitoire pour réaliser une généralisation complète des données routières de la BD CARTO pour une carte au 1: 250 000.

Signalons enfin un autre écueil que l'on peut rencontrer par utilisation d'une plate-forme générale comme par exemple celle d'Arc Info d'ESRI : par utilisation d'un langage interprété, les temps de réponse peuvent s'avérer rapidement trop préjudiciables, même en phase recherche, comme l'atteste l'expérience faite au laboratoire de Zürich [SCHLEGEL, WEIBEL 95].

L'existant ne répondant pas correctement aux besoins et étant source à terme de limitations originelles fatales, le laboratoire COGIT a opté en 1992 pour le développement d'une plate-forme servant de support pour toutes les recherches algorithmiques en généralisation cartographique en mode vecteur et permettant des expérimentations sur des lots de données importants.

Précisons qu'une autre plate-forme a été développée dans le laboratoire pour des recherches en généralisation contextuelle : Stratège. Destinée à prendre en compte l'environnement lors de la généralisation, cette plate-forme en orienté objet s'appuie sur une modélisation très riche des données et utilise des techniques d'intelligence artificielle, mais sans se soucier des problèmes de performance et de volume de données.

Les grands axes qui ont guidé la création de la plate-forme PlaGe sont :

- disponibilité de structures de données riches en topologie ;
- possibilité de visualiser les données linéaires sous différentes formes, en particulier avec l'emprise du symbole choisi pour l'échelle de rédaction souhaitée ;
- facilité d'implémenter et d'intégrer à la plate-forme les algorithmes de la littérature et ceux proposés par le laboratoire ;
- facilité de tester ces algorithmes et de définir les paramètres adaptés ;
- possibilité d'étudier le séquençement d'opérateurs de généralisation ;
- possibilité de réaliser des traitements numériques importants ;
- modularité de l'implémentation et de l'interface.

Soulignons l'importance de ce dernier point dans le cadre d'une équipe de recherche. En effet, plusieurs chercheurs travaillent au COGIT sur la généralisation dans des domaines proches et le laboratoire accueille aussi de nombreux stagiaires. C'est pourquoi, il est souhaitable de disposer d'un environnement de développement commun et d'une plate-forme fournissant l'accès aux différents thèmes de recherche, et que chaque utilisateur puisse ajouter aisément dans l'interface ses propres développements. Progressivement, la plate-forme doit s'enrichir des travaux de chaque chercheur.

## Éléments de base de PlaGe

### Structures de données

La première tâche pour le développement de cet environnement graphique a été de définir les structures de données. Une structure de graphe valué a été choisie avec comme éléments topologiques des nœuds, des arcs et des faces et comme liens topologiques [DAVID 91] : pour un nœud, les arcs issus du nœud ; pour un arc, le nœud initial et final, l'arc suivant et précédent, la face gauche et droite ; pour une face, les arcs constituants et le trou suivant. La métrique des arcs est enregistrée soit sous forme de liste de points, soit sous forme de liste de cubiques [AFFHOLDER 94]. Au niveau sémantique, les informations se limitent provisoirement à un attribut numérique, cet attribut servant à distinguer différents thèmes pour la représentation cartographique.

### Choix d'implémentation

Le laboratoire COGIT a opté pour l'utilisation d'ADA sur station Alpha de Digital. La structure de graphe est définie avec un type privé en ADA qui permet de limiter l'accès à cette structure uniquement via les fonctions offertes à l'utilisateur. Des fonctions de création, destruction, chargement et sauvegarde du graphe et des fonctions de manipulation des nœuds, des arcs et des faces (information, création, destruction et modification) sont écrites. Elles permettent de masquer complètement l'implémentation physique des données à l'utilisateur. Ainsi celui-ci peut implémenter très facilement sur ces structures un algorithme de filtrage par exemple (élimination de points d'une ligne) en se servant de trois fonctions (chargement du graphe, récupération de la liste des points d'un arc, modification de la liste des points d'un arc) et en conservant des temps de réponse performants par utilisation d'un langage compilé.

### Interface graphique

L'interface utilisateur est développée avec XLIB et Motif. Elle se compose d'une fenêtre principale constituée, d'une part, de boutons pour se déplacer, zoomer et afficher des informations de visualisation, d'autre part, d'une fenêtre de visualisation des données du graphe et enfin, d'une barre menu pour intégrer les différentes opérations de traitement des données (Cf. Figure B.3.2.1).

Pour optimiser les affichages des éléments du graphe quelles que soient les volumes de données, lors du chargement du graphe, les données topologiques (nœuds, arcs et faces) sont régionalisées en fonction d'un dallage rectangulaire (c'est-à-dire stockage de la liste des éléments topologiques contenus dans une dalle quelconque). Ainsi, les temps d'affichage restent toujours proportionnels aux nombres d'éléments affichés et non proportionnels au nombre d'éléments du graphe.



La barre menu offre des fonctions de base sur le graphe (ouverture, sauvegarde, fermeture) et des fonctions d'information sur les éléments topologiques pointés.

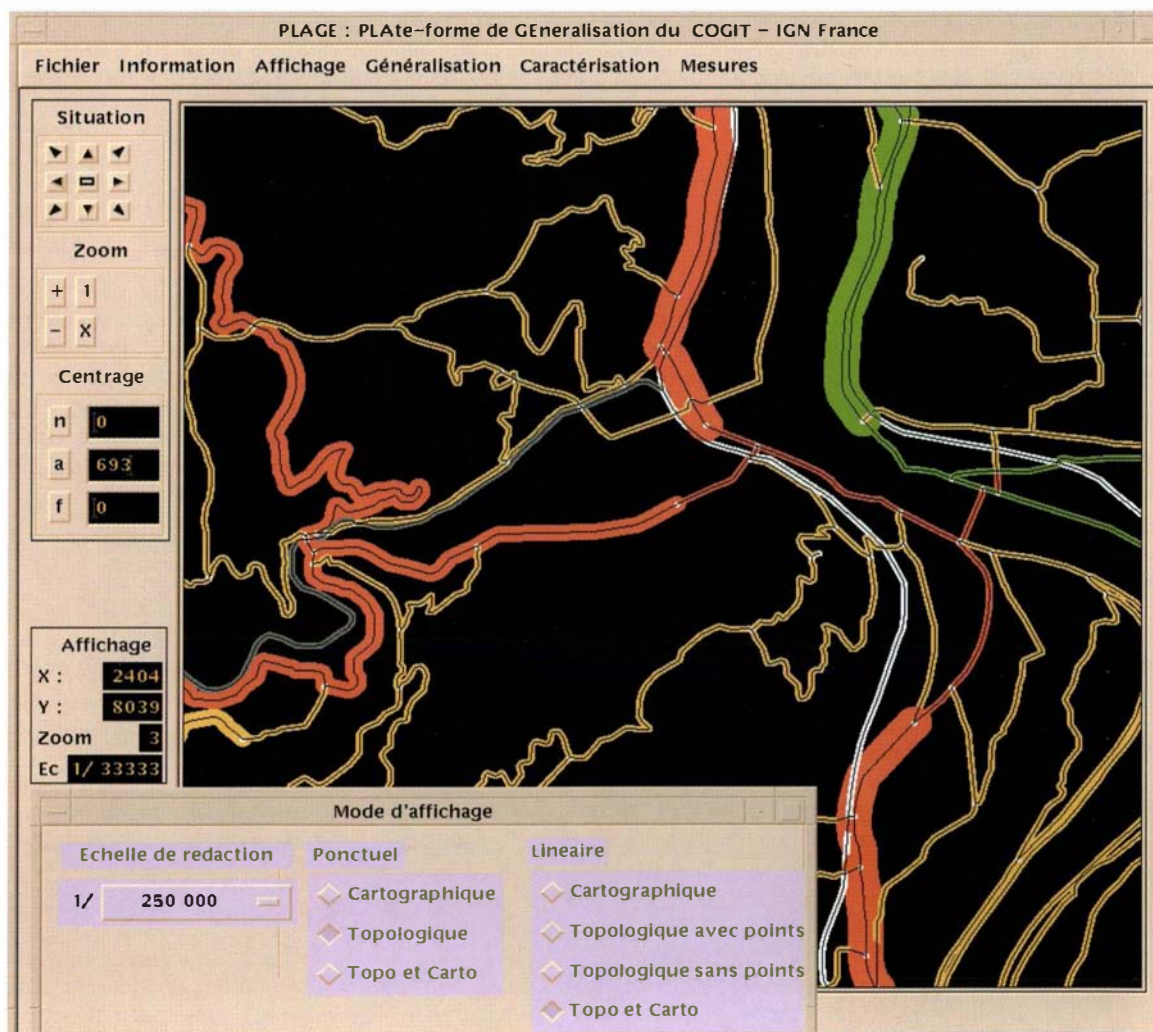
Un menu spécifique concerne le mode de visualisation des données, particulièrement celui des arcs. Il est possible d'afficher les arcs (et les nœuds) sous quatre formes différentes :

- l'axe de l'arc seul;
- l'axe de l'arc et les points intermédiaires,
- un ruban dont la largeur est fonction de l'attribut cartographique de l'arc et de l'échelle de rédaction;
- un ruban et l'axe de l'arc.

Précisons que les deux premiers modes s'affichent plus rapidement que les deux derniers, mais ceux-ci permettent de visualiser les problèmes de généralisation liés à l'emprise cartographique. Dans ces deux derniers modes, la modification du zoom d'affichage ou de l'échelle de rédaction conduit à modifier l'emprise du symbole affiché à l'écran, garantissant, à la résolution de l'écran prêt, un affichage identique à celui obtenu sur la carte papier rédigée à la même échelle et visualisée éventuellement avec une loupe.

Toujours dans le cadre de la visualisation, il est possible dans PlaGe de charger et d'afficher un deuxième graphe, servant d'élément de comparaison ou de référence. Ce graphe de comparaison peut être soit le graphe initial pour analyser les effets d'un algorithme de généralisation, soit un graphe généralisé manuellement pour comparer avec les résultats de la généralisation obtenue numériquement, soit un graphe servant d'appui pour la généralisation (i.e. : chargement d'un graphe de courbes de niveau lorsqu'on généralise un réseau routier).

Les autres menus concernent spécifiquement la généralisation.



**figure B.3.2.1 :**  
affichage d'un extrait de données routières de la BD Carto® sur PlaGe,  
avec une symbolisation au 1 : 250 000 et avec visualisation de l'axe central



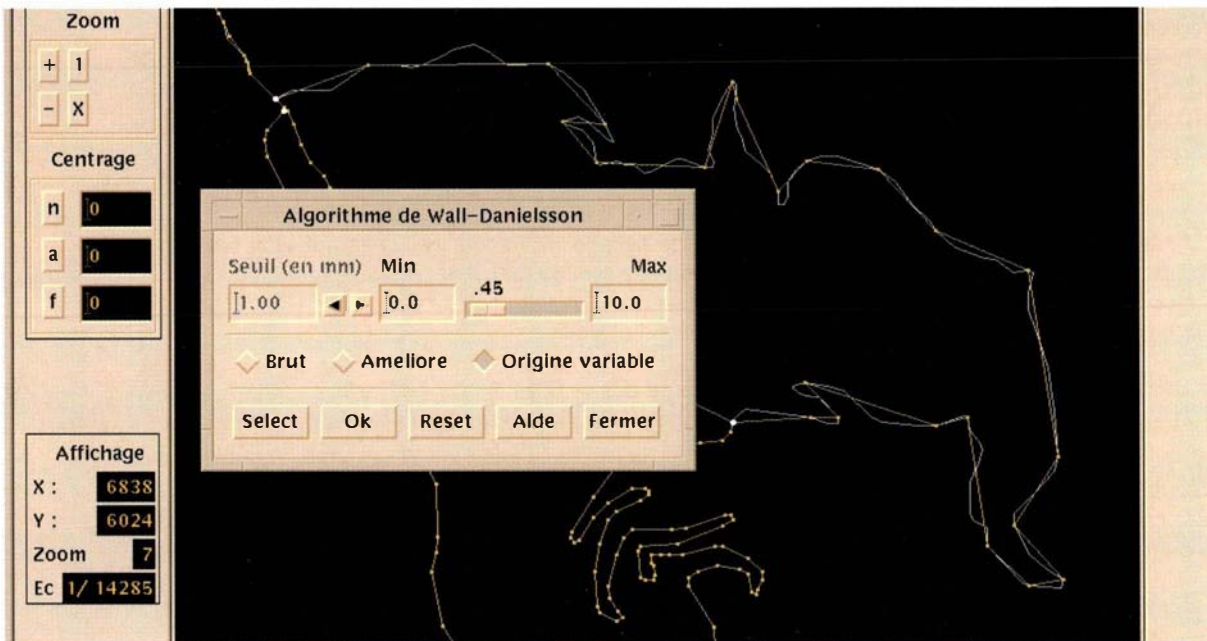
## Interface pour les algorithmes de généralisation

Avant le début des recherches du laboratoire COGIT sur la généralisation, il existait déjà divers algorithmes proposés pour certains opérateurs de base, comme par exemple le lissage et le filtrage de points. Même si aucun d'eux ne fournit une solution parfaite dans toutes les situations possibles (suivant la géométrie de la ligne, le facteur de réduction d'échelle, la symbolisation choisie), ils peuvent fournir dans certains cas des solutions intéressantes. Il est donc nécessaire dans un premier temps d'intégrer ces algorithmes dans la plate-forme pour les tester sur différentes données IGN et sur différentes gammes de réduction d'échelle.

Il a déjà été signalé que les choix d'implémentation effectués pour les structures de données de PlaGe permettent de programmer aisément et de façon performante divers algorithmes. Il est nécessaire que la même facilité et la même performance soient fournies au niveau de l'intégration dans la plate-forme.

Dans ce but, un premier module est fourni pour choisir les éléments topologiques manipulés (arcs, nœuds ou faces) et la manière de les sélectionner : soit par pointé, soit par emprise rectangulaire, soit par lot complet (l'ensemble du graphe), soit par liste d'éléments identifiés par leur numéro (ce mode étant spécifique à une phase de recherche).

Ensuite pour l'algorithme le plus classique de filtrage de [DOUGLAS, PEUCKER 73], une fenêtre d'interface type a été créée. Elle offre deux modes d'exécution de l'algorithme : soit par application directe sur l'ensemble des éléments sélectionnés selon le mode indiqué précédemment ; soit par application dynamique sur un élément, permettant par l'intermédiaire d'un variateur, de modifier la valeur du paramètre appliquée et de visualiser en continu les effets de cette modification (Figure B.3.2.2).



**figure B.3.2.2 :**  
*fenêtre d'interface d'un opérateur de généralisation (ici filtrage de Wall-Danielsson) dans PlaGe et comparaison des résultats avec l'arc initial (en blanc)*

En imitant alors cette fenêtre d'interface et en utilisant les mécanismes mis en place pour intégrer l'algorithme de Douglas dans la plate-forme PlaGe, il est alors aisé d'intégrer de nouveaux algorithmes sur différents opérateurs. Ainsi, ceci a été fait pour des algorithmes de la littérature de filtrage ([THAPA 89], [VAN HORN 86], [WALL, DANIELSSON 84], [LANG 69]) et de lissage (gaussien, [BROPHY 73], de Whirlpool [BEARD 91], de la moyenne [MC MASTER 89]) et des algorithmes interactifs de déplacement et d'élimination de nœuds, d'arcs et de face.

Sans entrer trop en détail dans les techniques de programmation, signalons simplement que pour générer les fenêtres d'interface, soit on utilise un générateur d'interface comme VUIT de Digital, soit on programme directement avec le langage UIL (User Interface Language) ; dans les deux cas, la fenêtre type s'avère un modèle très utile. D'autre part, grâce à la modularité du langage UIL et aux possibilités de sous librairie ADA, chaque utilisateur peut facilement, à partir de la version commune de la plate-forme, intégrer ses propres modules en modifiant seulement le programme principal (constitué d'une liste d'actions et d'une simple boucle d'attente d'événements XLIB) et en écrivant les programmes ADA de traitement qu'il souhaite et l'UIL générant l'interface de son module particulier.

A titre d'information, indiquons que l'intégration d'un algorithme simple de généralisation dans PlaGe avec une fenêtre d'interface standard demande au programmeur moins d'une demi-journée. D'autre part, grâce au langage compilé, l'exécution des calculs sur un graphe complet (plus de 5 000 arcs) s'effectue immédiatement (moins d'une minute), contrairement aux expériences faites en AML avec Arc Info [SCHLEGEL, WEIBEL 95] ou avec Map Generalizer d'Intergraph [ROUSSEAU & al 94].

## Expérimentations

Par l'intermédiaire de PlaGe, il est alors aisé d'expérimenter et d'analyser visuellement les différents algorithmes de lissage et filtrage.

L'affichage de la ligne sous forme d'axe avec les points intermédiaires permet de se rendre compte du principe de l'algorithme appliqué, tandis que l'affichage cartographique permet d'avoir immédiatement, à l'échelle souhaitée, un rendu cartographique de l'effet de l'algorithme. Les différents modes de sélection des éléments manipulés et le mode de traitement (dynamique ou non) fournissent des solutions simples pour régler d'abord les paramètres, puis pour appliquer ceux-ci sur un lot complet d'éléments. Les différents algorithmes déjà intégrés dans PlaGe permettent de comparer aisément les avantages et les inconvénients de chacun d'eux. Les possibilités de comparaison avec le graphe initial ou un graphe généralisé manuellement permettent aussi de mieux analyser les effets des différents algorithmes.

Les expérimentations sur PlaGe ont permis de faire ressortir trois conclusions importantes :

- Il semble impossible de trouver un algorithme ou un enchaînement d'algorithmes avec des valeurs de paramètres adaptés fournissant un résultat satisfaisant pour l'ensemble des lignes. Et même, pour certaines lignes prises isolément, aucun algorithme n'est satisfaisant : il faut en fait appliquer des algorithmes différents sur certaines portions de la ligne. Il est donc nécessaire de segmenter la ligne.
- Il manque des algorithmes de caricature s'appliquant localement sur certains virages.
- Les algorithmes de lissage ont tous tendance à diminuer les amplitudes des virages et il est donc nécessaire de corriger cette tendance par un algorithme de caricature s'appliquant sur la ligne complète.

Ces constatations ont guidé les deux axes de recherche décrits ci-dessous.

## Algorithmes pour la caricature

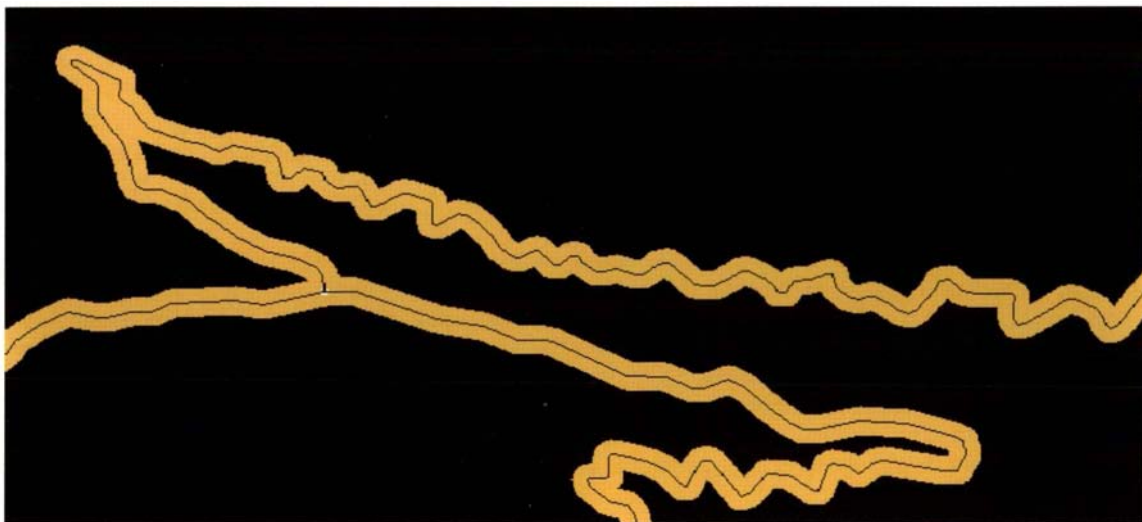
### Manque d'algorithme de caricature

En utilisant sur PlaGe, les algorithmes précédents de lissage et filtrage de lignes sur le réseau routier de la BDCARTO (saisie à l'échelle du 1 : 50 000) pour une rédaction au 1 : 250 000, il apparaît clairement qu'il est impossible d'obtenir un résultat cartographique satisfaisant du fait de l'absence d'algorithmes de caricature. Cet opérateur a pour but d'exagérer légèrement les formes pour les rendre perceptibles ou lisibles.

Ce manque se fait particulièrement sentir dans deux cas (figure B.3.2.3) :

- les routes très légèrement sinueuses où il serait nécessaire d'éliminer certaines sinuosités et d'en exagérer d'autres, afin que le lecteur observe non pas une ligne "tremblotante" mais une série de virages de faible amplitude ;
- localement sur les virages en lacets où il apparaît des empâtements du fait de la largeur du signe utilisé pour la rédaction de la carte et où il serait nécessaire d'écarter les virages, voire d'en éliminer constituant alors une opération plus complexe appelée schématisation.

Or, vraisemblablement liés à l'absence fréquente d'interface avec symbolisation, ces problèmes de caricature ont rarement été abordés par les recherches en généralisation.



**figure B.3.2.3** : affichage d'une route rédigée au 1 : 250 000 nécessitant l'application d'opérations de caricature : à gauche, un virage empâté ; au milieu, une route légèrement sinueuse offrant une impression de dessin tremblotant peu esthétique

## Algorithmes de caricature

Pour remédier à ces manques d'algorithmes de caricature, le laboratoire COGIT a étudié différentes solutions et propose quelques algorithmes.

### Adaptation de Lowe

Un algorithme de lissage testé sur PlaGe est le lissage par convolution avec un filtre gaussien. La ligne est décomposée en segments de longueur égale (équivalente à l'unité de résolution du graphe). A chaque point de la ligne initiale (X, Y) correspond un homologue sur la ligne lissée de coordonnées (X<sub>l</sub>, Y<sub>l</sub>) :

$$X_l = \sum_{k=-4\sigma}^{4\sigma} X(i-k) \cdot g_\sigma(k) \quad Y_l = \sum_{k=-4\sigma}^{4\sigma} Y(i-k) \cdot g_\sigma(k) \quad g_\sigma(k) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-k^2 / 2\sigma^2}$$

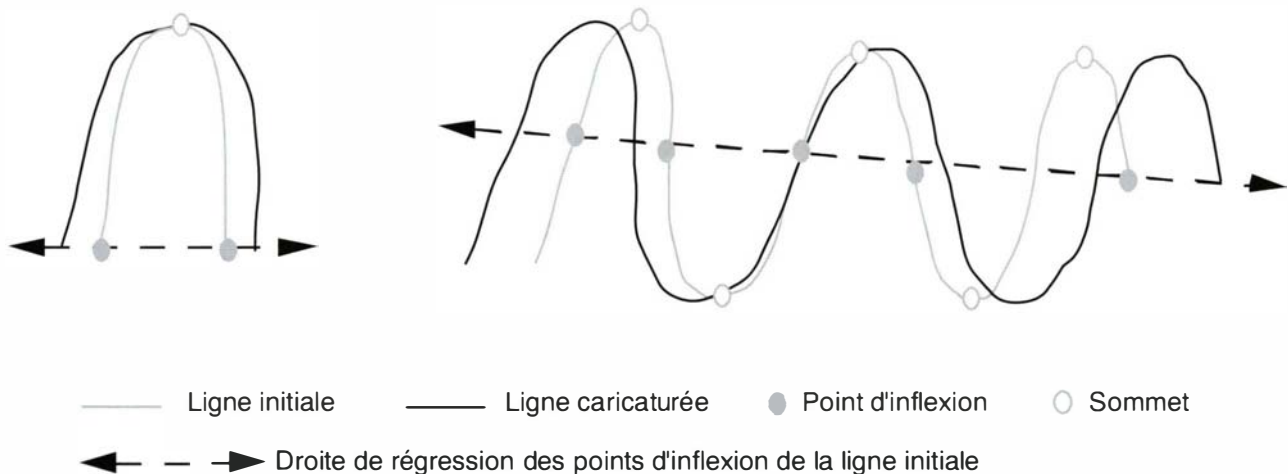
Ce lissage a pour tendance de déplacer les points vers un barycentre dont la direction est proche de celle du centre de courbure. Pour corriger cette tendance, une méthode implémentée au COGIT consiste à déplacer chaque point d'une distance croissant avec la courbure R ([LOWE 88]) :

$$C_1 = Cste \times R \times e^{-\sigma^2 / R^2}$$

Si la valeur de la constante augmente, on provoque une caricature surtout dans le sens de la flèche du virage.

### Algorithme de l'accordéon

Pour un virage ou une série de virages serrés, du fait de la symbolisation, on peut observer l'apparition d'une zone d'empâtement au sommet du virage et éventuellement à la base du virage. Pour résoudre ces conflits internes dus à la symbolisation, un premier algorithme, proposé par [PLAZANET 96] et appelé "l'accordéon", a pour but d'écarter les virages à leur base, d'une manière très similaire à celle de l'instrument de musique du même nom.



**figure B.3.2.4** : schéma de l'algorithme de l'accordéon sur un ou plusieurs virages

Pour les travaux de caractérisation et de modélisation par cubiques des lignes, des algorithmes ont été développés pour déterminer les points d'inflexion et les sommets situés entre deux points d'inflexion successifs [PLAZANET 94]. Les points d'inflexion, constituant la base des virages, sont calculés après application d'un lissage gaussien. Pour réaliser alors cet algorithme de l'accordéon, on calcule d'abord la droite de régression s'appuyant sur les points d'inflexion de la série de virages serrés.

- 1er cas : virage unique : on décale les points intermédiaires du virage parallèlement à la droite reliant les deux points d'inflexion, dans des sens opposés pour les points situés avant ou après le sommet du virage et d'une distance proportionnelle à l'abscisse curviligne entre le point intermédiaire et le premier point d'inflexion. Soit la formule de déplacement des points intermédiaires du virage :

$$X_c = X_i + \text{Epsilon} \cdot \text{Sens} \cdot b \cdot (s/s_v - 0.5)$$

$$Y_c = Y_i + \text{Epsilon} \cdot \text{Sens} \cdot a \cdot (s/s_v - 0.5)$$

avec : Epsilon = facteur d'écartement du virage  
 Sens = +1 ou -1 suivant la position du point par rapport au sommet du virage  
 a et b coefficients de direction de la droite reliant les points d'inflexion  
 $s_v$  = abscisse curviligne du virage entre les 2 points d'inflexion  
 s = abscisse curviligne du point par rapport au premier point d'inflexion

- 2ème cas : série de virages : le principe précédent est étendu à la série de virages en répercutant le déplacement effectué sur un virage aux virages suivants. Le point invariant est l'un des points d'inflexion situé sur le virage central. La formule est alors :

$$X_C = X_i + \text{Epsilon} \cdot \text{Sens} \cdot b \cdot (s/s_v + (v-1))$$

$$Y_C = Y_i + \text{Epsilon} \cdot \text{Sens} \cdot a \cdot (s/s_v + (v-1))$$

avec v numéro du virage par rapport au point d'inflexion, unique, invariant.

Actuellement la valeur de l'écartement Epsilon effectué sur chaque virage est un paramètre qui est fixe pour la série de virages, mais il est possible aisément de fournir une valeur liée à l'empâtement calculé à la base de chaque virage.

Les résultats souhaités sont obtenus à savoir un étalement de la série de virages, éliminant ainsi les recouvrements au niveau de la base des virages. Provoquant un déplacement des deux extrémités délimitant la série de virages, il est nécessaire de le répercuter avec un amortissement sur les deux portions de courbe poursuivant la série de virages. Ce problème est en cours d'étude.

#### Algorithme de la baudruche

Suite à l'algorithme précédent, on peut obtenir des virages n'ayant plus d'empâtement au niveau de la base mais encore au niveau du sommet du virage. En augmentant la valeur d'écartement à la base, il est possible de résoudre le problème mais au détriment de la précision géométrique de la base du virage qui se retrouvera très espacée. C'est pourquoi un autre algorithme est proposé pour écartier principalement au niveau du sommet sans déplacer les deux points de la base. L'analogie physique du principe retenu est un ballon baudruche que l'on gonfle.

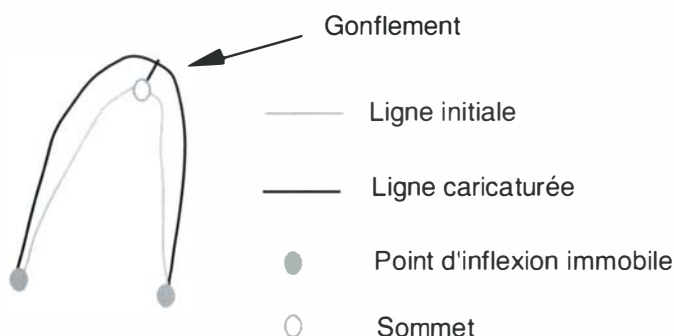


figure B.3.2.5 : schéma de l'algorithme de la baudruche

Le principe est de décaler les points intermédiaires dans la direction de la normale à la courbe au point considéré, d'une valeur proportionnelle à l'abscisse curviligne comprise entre le point d'inflexion et le sommet du virage; le déplacement est alors nul au point d'inflexion et maximum au sommet. L'expression mathématique donnant le déplacement des points intermédiaires compris entre le point d'inflexion et le sommet est :

$$X_C = X_i + \text{Gonflement} \cdot \text{sens} \cdot u \cdot s/s_v$$

$$Y_C = Y_i + \text{Gonflement} \cdot \text{sens} \cdot v \cdot s/s_v$$

avec : Gonflement = facteur de gonflement du virage  
 sens = +1 ou -1 suivant le signe de la courbure du virage  
 u et v coefficients de direction de la normale à la courbe au point considéré  
 $s_v$  = abscisse curviligne du virage entre le point d'inflexion et le sommet  
 s = abscisse curviligne du point par rapport au point d'inflexion

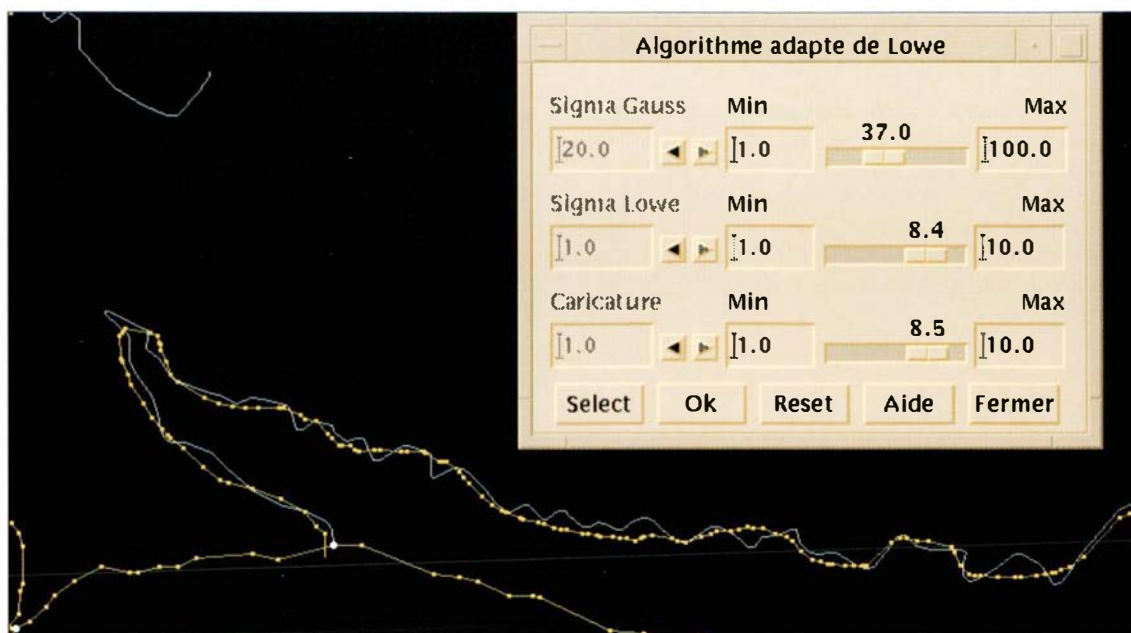
#### Mode opératoire de caricature

Ces différents algorithmes ont été intégrés dans PlaGe suivant les spécifications indiquées précédemment, permettant alors de tester aisément les effets de ces algorithmes. En se limitant à un virage, on dispose en fait de 3 opérateurs élémentaires permettant de déplacer :

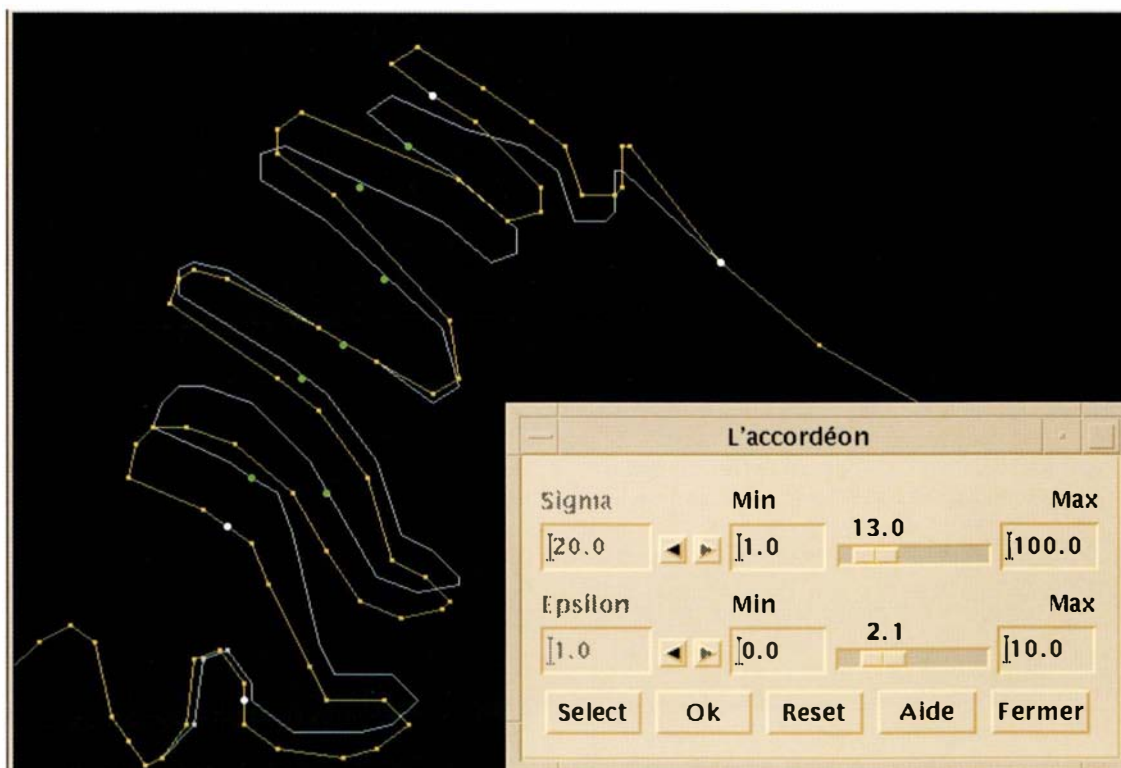
- le sommet du virage dans le sens de la flèche ;
- la base du virage par écartement ;
- le virage par gonflement (en laissant la base fixe).



Les figures B.3.2.6 et B.3.2.7 montrent les résultats obtenus sur PlaGe avec l'adaptation de Lowe et les algorithmes de l'accordéon et de la baudruche.



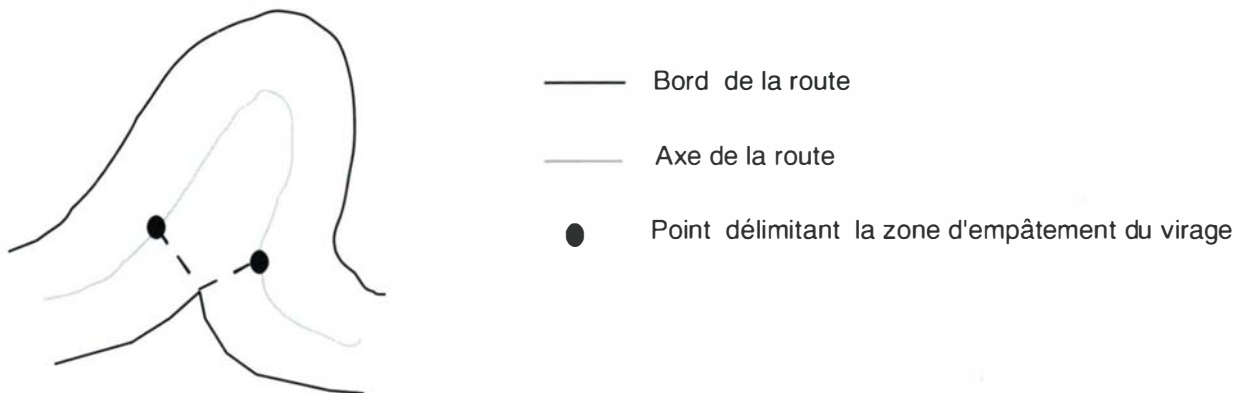
*figure B.3.2.6 : résultat de l'algorithme de l'adaptation de Lowe sur une route mollement sinueuse avec comparaison dans PlaGe avec la courbe initiale (en blanc)*



*figure B.3.2.7 : résultat de l'algorithme de l'accordéon sur une route en lacets avec comparaison dans PlaGe avec la courbe initiale (en blanc)*

En plus de ces opérateurs de caricature élémentaires, il peut être intéressant, dans un premier temps, de simplement guider le travail du cartographe en détectant automatiquement les virages présentant un problème et en laissant le soin au cartographe de corriger cette anomalie. Ce principe semi-automatique (ou interactif guidé) a déjà été utilisée de manière très satisfaisante dans les chaînes de saisie par scannage de documents graphiques utilisées à l'IGN [LECORDIX 89]. Il est donc nécessaire de détecter automatiquement les zones d'empâtement.

Or, dans le cadre d'un stage sur les mesures en vue de la qualification des lignes et de la validation des opérateurs de généralisation, une procédure a été développée pour calculer en mode vecteur les deux bords de route en fonction de la largeur du signe [MUSTIERE 95]. A partir de ces deux bords de route (figure B.3.2.8), on détermine les points de l'axe de la route qui sont éloignés du bord d'une valeur supérieure à la demi largeur du signe cartographique plus une tolérance. Grâce à ce calcul, il est alors possible d'afficher automatiquement au centre de la fenêtre de visualisation, les points de l'arc comportant un empâtement et le cartographe le corrige via les outils de PlaGe en appliquant soit l'algorithme de l'accordéon, soit celui de la baudruche.



*figure B.3.2.8 : détection des zones d'empâtement de virage après calcul des deux bords de route*

## Approche pour l'automatisation

L'interaction homme-machine décrite précédemment constitue une première assistance à la généralisation. Cependant l'objectif final de nos recherches est d'automatiser autant que possible le processus de généralisation.

La démarche retenue pour l'automatisation de la généralisation du réseau routier consiste à décomposer la ligne en portions homogènes, puis à qualifier chaque portion en fonction de critères géométriques (sinuosité, forme...) afin de répartir les portions dans différentes classes et d'appliquer les algorithmes et les paramètres adaptés à chaque classe [PLAZANET 94].

Dans cette démarche, il est nécessaire que la décomposition et la qualification soient les plus pertinentes possibles. Or, même si l'objectif est l'automatisation, l'utilisation de la visualisation s'avère aussi efficace. C'est pourquoi, la barre menu de PlaGe offre la possibilité de faire des opérations de caractérisation et de mesures.

Dans le menu de caractérisation, il est possible d'activer des fenêtres permettant de :

- visualiser les points d'inflexion et les sommets des virages détectés sur la ligne en fonction d'un paramètre (le  $\sigma$  du lissage gaussien),
- segmenter la ligne,
- classifier en  $n$  catégories, avec l'algorithme de K-Means, les lignes segmentées en utilisant un ensemble de mesures particulières.

Dans le menu de mesures, en cours de développement, il sera possible de choisir des mesures (et de lire leur résultat) qu'on souhaite utiliser pour réaliser la qualification des lignes sélectionnées.

Ces menus et les fenêtres associées ne répondent qu'aux besoins actuels exprimés par l'équipe de recherche. Grâce à la modularité et à la facilité d'intégration dans PlaGe, la plate-forme s'enrichit fréquemment de nouveaux modules permettant de faire progresser nos recherches pour l'automatisation de la généralisation.

## Conclusion

La plate-forme de généralisation cartographique PlaGe du COGIT constitue donc un support important pour nos recherches : s'appuyant sur des structures de données riches topologiquement et offrant diverses possibilités d'affichage, elle permet de tester les algorithmes de la littérature et ceux proposés par le laboratoire comme pour la caricature. Elle permet aussi de faciliter les recherches en vue de l'automatisation du processus de généralisation cartographique.

PlaGe n'est pas une fin en soit, mais un outil. Dans les mois qui viennent, PlaGe va être utilisée pour la réalisation d'une maquette de généralisation cartographique d'éléments linéaires. Cette maquette utilisera les algorithmes de lissage, filtrage, caricature, segmentation et caractérisation qui ont été présentés dans ce texte. Pour obtenir une maquette de généralisation complète, il sera nécessaire de rajouter des opérateurs de déplacements inter objets, rejoignant alors les recherches entreprises dans le cadre de l'action de recherche en généralisation cartographique par intelligence artificielle.

## Références

- [AFFHOLDER 94] J.G. Affholder : *Une modélisation du linéaire routier en vue de la généralisation*, IGN, Service de la Recherche DT94-0184 Paris, février 1994.
- [BEARD 91] K. Beard : *Theory of the cartographic line revisited. Implications for automated generalization*. Cartographica , volume 28 , n. 4, pp. 32 - 58 , 1991.
- [BROPHY 73] D. Brophy : *An automated methodology for linear generalization in thematic cartography* . Actes de la conférence de l'ACSM, 33ème année, Washington, p. 300 -314, 1973.
- [DAVID 91] B. David : *Modélisation, représentation et gestion d'informations géographiques*, thèse de doctorat, Université Paris 6, 1991.
- [DOUGLAS, PEUCKER 73] D. Douglas & T.Peucker : *Algorithms for the reduction of the number of points to represent a linear its caricature* . The Canadian Cartographer volume 10 (2), pp. 112-123, 1973.
- [LANG 69] T. Lang : *Rules for robot draughtsmen*, Geographical Magazine (62) p. 50 -51, 1969.
- [LECORDIX 89] F. Lecordix : *Etablissement d'une chaine standard de traitement du linéaire au Semio* . Rapport UFSI de l'Institut Géographique National, Paris, mai 1989.
- [LOWE 88] D.G. Lowe : *Organization of smooth image curves at multiple scales*, Actes du congrès ICCV, p. 558 - 567, 1988.
- [MC MASTER 89] R. Mc Master : *The integration of simplification and smoothing algorithms in line generalization*, Cartographica 26, p 101- 121, 1989.
- [MUSTIERE 95] S. Mustiere : *Mesures de la qualité de la généralisation du linéaire*, Rapport de stage de DESS de cartographie, Université Paris I/ Ecole Nationale des Sciences Géographiques, septembre 1995.
- [PLAZANET 94] C. Plazanet, J.P.L. Lagrange, J.G. Affholder, A. Ruas : *Représentation et analyse des formes pour l'automatisation de la généralisation cartographique*, Actes du congrès EGIS, volume 2, p 1112 - 1121, Paris, mars-avril 1994.
- [PLAZANET 96] C. Plazanet : *Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique (application aux routes)*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, spécialité : Sciences de l'Information Géographique, IGN, Direction Technique, Service de la Recherche, SR 960017/S-THE, soutenue le 3 octobre 1996.
- [ROUSSEAU & al 89] D. Rousseau, T. Rousseau & F. Lecordix : *Expertise de Map Generalizer, logiciel de généralisation interactive d'Intergraph*. Rapport technique de l'Institut Géographique National. Paris, décembre 1994
- [RUAS, LAGRANGE 92] A. Ruas & J.P. Lagrange : *Etat de l'art en généralisation*. Rapport technique de l'Institut Géographique National. Paris, novembre 1992
- [SCHLEGEL, WEIBEL 95] A. Schlegel & R. Weibel : *Extending a general-purpose GIS for computer-assisted generalization*. Actes du congrès de l'Association de Cartographie Internationale, 17ème édition, vol. 2, pp. 2211-2220 Barcelone, septembre 1995.
- [THAPA 88] K. Thapa : *Automatic line generalization using zero-crossings* . Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Volume 54 (4), p. 511-517 , avril 1988
- [VAN HORN 86] E. Van Horn : *Generalizing cartographic data bases*, Actes d'AUTOCARTO 7, p 532-540, 1986.
- [WALL, DANIELSSON 84] K. Wall & P.E. Danielsson : *A Fast sequential method for polygonal approximation of digitized curves*. Actes de Computer Vision, Graphic, and Image 28, p 220-227, 1984.

## Publications

- [PLAZANET 95] C. Plazanet : *Measurements, characterization and classification for automated line feature generalization* Actes du congrès de AUTOCARTO 12, 12ème édition, vol. 2, pp. 2211-2220 Charlotte, février 1995.
- [ROUSSEAU & al 95] D. Rousseau, T. Rousseau & F. Lecordix : *An evaluation of Map Generalizer, An Intergraph Interactive Generalization software package*. Traduction d'un rapport technique de l'Institut Géographique National. Paris, février 1995.

## B.3.3 Traitement des effets de bord des algorithmes de généralisation : mécanismes de déplacement

par Anne Ruas

### Introduction

Au niveau le plus bas, la généralisation de données géographiques est constituée d'une suite d'algorithmes, essentiellement géométriques, appliqués sur un ou plusieurs objets. Si le développement d'algorithmes reste une tâche indispensable, la difficulté de la généralisation vient aussi du choix de la bonne séquence d'algorithmes en fonction des caractéristiques des objets à traiter et de la non dégradation involontaire des objets due à l'application d'algorithmes. Au laboratoire COGIT nous faisons la distinction entre la généralisation intrinsèque (i.e. le traitement d'un objet sans prendre en compte son environnement) et la généralisation contextuelle (i.e. prise en compte d'un ensemble d'objets pour choisir et agir). Le déplacement d'objets est une opération fréquente en généralisation. C'est une opération contextuelle puisqu'il y a un déplacement lorsque des objets sont trop près les uns des autres. Un déplacement peut être dû soit à la distance minimum requise pour discerner les objets (i.e. l'équivalent du 1/10 de millimètre sur une carte papier), soit à l'application d'une autre opération de généralisation. En effet, lorsqu'une ligne est simplifiée ou qu'un bâtiment est agrandi, l'objet modifié utilise un espace qui n'était pas le sien et qui pouvait éventuellement être occupé par un autre objet. En cas de trop grande proximité ou de superposition, il est alors indispensable de trouver une solution: soit on décide que l'opération initiale est incorrecte, soit on élimine des objets de moindre importance, soit on déplace ou déforme les objets proches pour maintenir la base dans un état cohérent.

Nous nous concentrons dans cet article sur les mécanismes de déplacement sachant que pour certaines configurations le déplacement n'est pas la meilleure méthode de résolution. Le déplacement d'objets pose trois problèmes majeur :

- 1 - un déplacement dégrade la précision absolue des données,
- 2 - un déplacement peut induire d'autres déplacements,
- 3 - selon les configurations, les directions logiques de déplacement ne sont pas les meilleures.

Nous utilisons le terme déplacement dans un sens large. Au niveau des transformations géométriques, il s'agit de translations pour des objets isolés et de petite taille (e.g. maisons, tûls, château d'eau) et de déformations locales pour les autres objets (e.g. routes, limites de forêt).

### Contexte - objectifs

*Bref état de l'art sur les déplacements* : Un certain nombre de travaux ont été réalisés sur les déplacements, parmi lesquels:

- [LICHTNER, 79] et [NICKERSON, 88] calculent des déformations locales entre lignes en intégrant la largeur de leur symbole; [JÄGER,91] déplace des maisons le long des routes en calculant l'écart de symbolisation des routes et en faisant glisser les maisons perpendiculairement aux routes symbolisées. Ces mécanismes déplacent les objets dans une direction prédéfinie et ne gèrent pas de propagation de deuxième ordre;

- [MACKANESS, 94] calcule un déplacement radial des sommets des objets à partir du centre d'une zone de forte densité. Ce mécanisme est original dans la mesure où il part d'un conflit de densité et propage en amortissant des déplacements. Par contre la forme des objets n'est pas prise en compte et le choix d'un déplacement radial n'est pas l'idéal pour certaines configurations.

- [BJAIES, 96] utilise une technique multi-agents où chaque agent représente un sommet d'un objet et calcule le déplacement qu'il doit subir pour ne pas être trop proche d'un autre agent. Cette approche très locale a l'avantage d'être performante mais détruit rapidement la forme des objets. Elle est réalisée par le LIFIA en collaboration avec le COGIT dans le cadre du PSIG.

Dans l'ensemble ces techniques ont pour fonction d'assurer une distance minimale entre objets et non de propager une déformation.



*Objectifs du laboratoire COGIT* : Une grande partie des recherches réalisées au laboratoire COGIT concerne la généralisation des éléments linéaires et principalement routiers. On constate que ces algorithmes ont des effets de bord qui ne sont jamais pris en compte. L'idée est donc de calculer les déformations induites par un ou une série d'algorithmes et de propager les déformations locales sur l'environnement de la ligne généralisée. Nous travaillons en zone urbaine à partir des données de la BD Topo, où de nombreux problèmes dus à la proximité des objets existent. Les objets à déplacer sont principalement des maisons.

Les objectifs sont :

- 1 - de propager et d'amortir des déformations,
- 2 - de contraindre les déplacements en fonction de la nature des objets,
- 3 - d'identifier les propagations problématiques et de proposer des solutions de rechange. Dans un deuxième temps nous adapterons ce mécanisme aux problèmes liés à la symbolisation des objets et à leur agrandissement.

*Environnement de programmation* : Nous travaillons sur la plateforme *Stratège* développée au COGIT depuis 1993. *Stratège* est munie d'une représentation de données en orientée objet et d'un langage de règles. Il permet d'étudier les problèmes nécessitant une représentation complexe de l'information et pour lesquels le séquençage d'opérations est incertain. Ce système est dédié à la généralisation contextuelle (par ex: sélection, déplacement, agrégation) et plus généralement aux choix des stratégies de généralisation en fonction des spécifications de la généralisation et des configurations locales.

## Modélisation des relations de proximité

En généralisation contextuelle nous avons besoin de décrire le positionnement relatif d'un ensemble d'objets pour prendre des décisions et pour réaliser des transformations telles que les déplacements ou les agrégations. Les relations topologiques permettent de décrire les relations de connexités et d'inclusion mais pas de décrire le positionnement relatif entre objets non connexes, ni d'avoir une idée des espaces disponibles. Décrire parfaitement les relations spatiales entre objets est complexe surtout lorsqu'on travaille avec des lignes et des surfaces. En étudiant au cas par cas les problèmes à résoudre, on se rend compte que selon les tâches à accomplir nous décrirons ces relations de différentes façons.

### Les relations de proximité pour la propagation des déplacements

Dans le cas de la propagation d'une déformation d'une ligne sur des objets isolés, on veut trouver les relations de voisinage entre la ligne modifiée et ses objets proches isolés (par exemple entre une route et des maisons) pour propager au mieux la déformation de la ligne. On peut distinguer plusieurs situations:

- 1 - une maison proche de la ligne déformée hérite d'une ou plusieurs déformations en fonction de la taille de la maison et de la déformation de la ligne. Une maison aura donc une ou plusieurs relations de proximité avec une ligne.
- 2 - les maisons propagent leur déplacement. Il faut donc trouver, pour chaque maison ses plus proches maisons voisines.
- 3 - les maisons sont contraintes de ne pas traverser des lignes fixes, elles sont donc également liées à des objets linéaires.

Nous avons donc besoin de trouver les voisins de chaque objet surfacique isolé ainsi que les relations de proximité entre ces surfaces et les objets linéaires environnants. De plus la propagation des déformations est liée à la distance entre objets puisque la propagation est d'autant moins atténuée que les objets sont proches et inversement, au delà d'une certaine distance la propagation s'arrête. Nous devons donc trouver pour chaque objet l'ensemble de ses voisins et la distance qui les sépare.

### Utilisation d'une triangulation de Delaunay pour définir les voisinages

La triangulation de Delaunay crée, à partir d'un ensemble de points, un partitionnement de l'espace composé de triangles en minimisant les écarts entre les angles des triangles. C'est une méthode classique pour trouver les voisins directs de chaque point dans un ensemble de points. Une triangulation calculée à partir de toutes les coordonnées des objets serait possible [BUNDY et al, 95] mais génère une structure très dense qu'il devient difficile de manipuler. Nous avons donc choisi les principes suivants: un objet surfacique isolé est représenté par un nœud de la triangulation, tous les nœuds issus de ces surfaces sont projetés sur les lignes proches pour y positionner d'autres nœuds. Chaque nœud de la triangulation est donc liée soit à une surface soit à une ligne. Une triangulation de Delaunay est calculée à partir de cet ensemble de nœuds. Un arc de la triangulation représente donc une relation de proximité entre les objets géométriques. Chaque arc est ensuite valué par la plus petite projection entre soit un nœud de la ligne et une surface, soit entre deux surfaces. Chaque projection possède une géométrie propre, différente de la géométrie de l'arc.

De plus, afin de répercuter correctement les déformations de la ligne sur les polygones, certains points sont ajoutés sur les lignes. Nous avons choisi d'ajouter des sommets secondaires, susceptibles d'être soit davantage déplacés soit naturellement plus proches d'autres objets. Ils sont sélectionnés par application d'un algorithme de filtrage, Douglas et Peucker, qui conserve les sommets secondaires.

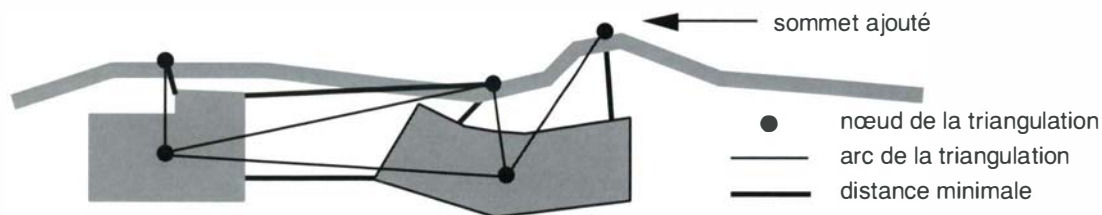


figure B.3.3.1 : relation de proximité entre polygones et lignes

## Mécanisme de propagation d'une déformation linéaire sur des objets isolés

### Principes

Après chaque transformation géométrique d'une ligne, nous calculons les déformations locales entre la géométrie initiale et finale de la ligne, et nous propageons ces déformations, en les atténuant, sur le voisinage de la ligne. La localisation des points où la déformation est calculée ne dépend pas de la segmentation initiale de ligne mais des relations de proximité qui existent entre cette ligne et son voisinage (cf l'utilisation d'une triangulation de Delaunay). Afin d'éviter de trop propager les déformations, nous choisissons un espace de travail qui limite l'espace de propagation. C'est dans cet espace que sont calculées les relations de proximité à l'aide d'une triangulation de Delaunay évaluée par les projections entre objets. Lorsqu'un objet reçoit un déplacement, il le propage à ses voisins en l'atténuant. La valeur de l'atténuation est fonction de la distance réelle entre les objets, de l'espace minimal de séparation et de la valeur de déplacement à propager. Les déplacements sont soit des attractions soit des répulsions.

Le mécanisme de propagation est séquentiel. L'objectif est de rechercher, à chaque étape, le meilleur objet suivant à déplacer. Nous recherchons donc l'objet subissant le plus fort conflit de proximité par un déplacement. Une fois que cet objet est trouvé, on agrège les déplacements qu'il reçoit de ses voisins, via les arcs de la triangulation, tout en les atténuant. Cet objet ne sera plus déplacé et peut à son tour propager son déplacement à ses voisins.

Compte tenu de la densité locale d'objets, il peut arriver que le déplacement calculé provoque des conflits avec les lignes devant rester fixes. Nous calculons donc pour chaque déplacement les conflits potentiels provoqués avec ces lignes. En cas de conflit, plusieurs solutions existent: soit on atténue le déplacement, soit on déplace l'objet dans une autre direction. Pour ce faire, on introduit dans le modèle des directions d'échappement qui correspondent aux espaces moins denses contenus dans la zone de travail, et vers lesquels un objet peut se déplacer. Si l'introduction de ces forces ne suffit pas, on en conclut que la propagation n'est pas faisable sans un pré-traitement visant à réduire la densité d'objets, soit par l'élimination contrôlée de certains objets soit par des agrégations. L'idéal serait tout de même de décider de ces traitements avant de débiter les déplacements par un contrôle local des densités et des conflits de proximité.

Afin d'optimiser les temps de calcul, les arcs de la triangulation pour lesquels la distance réelle entre les objets est nettement supérieure à la déformation maximale initiale sont inactivés.

### Recherche du meilleur objet à déplacer

Le meilleur objet suivant à déplacer est celui pour lequel la contrainte de proximité est la moins respectée par propagation d'un déplacement. Soit  $O_1$  et  $O_2$  deux objets surfaciques,  $P_{1i}$  un lieu sur  $O_1$ ,  $P_{2j}$  un lieu sur  $O_2$  et  $dep(O_1)$  le déplacement vectoriel que  $O_1$  a subi et qu'il doit éventuellement propager à  $O_2$ . La plus forte violation de contrainte de proximité est donc :

$$VC\text{-prox}(O_1, O_2) = \text{MIN}_{[P_{1i}, P_{2j}]} [ \text{distance}(P_{1i}, P_{2j}) - |dep(O_1)| \cdot \cos[\text{dep}(O_1), \text{vect}(O_1, O_2)] ]$$

Si cette valeur est négative, les objets s'intersecteraient si on ne déplaçait pas  $O_2$ . La recherche de  $P_{1i}, P_{2j}$  peut être longue. On peut donc utiliser différentes approximations qui n'aboutiront peut être pas au meilleur objet mais à l'un des meilleurs à déplacer. Une des solutions consiste à remplacer les deux meilleurs points des objets par les points de la plus courte projection entre les deux objets, ou de prendre la valeur la plus petite entre cette approximation et la projection du vecteur de déplacement selon la direction de l'arc de la triangulation. En pratique, la première approximation semble donner des résultats satisfaisants.

### Forces d'attractions et de répulsions; fonctions d'atténuation

Une fois qu'un nœud est choisi, on calcule les déplacements qu'il subit, qui sont soit des attractions soit des répulsions. Afin de ne pas trop déformer l'espace, ces déplacements sont amortis mais ne sont pas réduits à une situation minimisant les déplacements. On essaye de respecter les positionnements relatifs entre objets selon les principes suivants :

-  $O_1$  se rapproche de  $O_2$ , donc va peut être induire une répulsion. Lorsque le déplacement de  $O_1$  vers  $O_2$  provoque soit une intersection soit une distance inférieure au seuil de résolution,  $O_2$  doit être déplacé. Si la distance entre les objets est importante, une propagation est inutile. Entre ces deux situations le déplacement est progressivement amorti.

-  $O_1$  s'éloigne de  $O_2$ , donc va peut être induire une attraction. Si les deux objets sont initialement trop proches, l'éloignement de  $O_1$  va réduire son conflit de proximité avec  $O_2$ , il est donc inutile de déplacer  $O_2$ . De même si les objets sont trop éloignés, un déplacement est inutile. Une fonction croissante puis décroissante de propagation est donc utilisée.

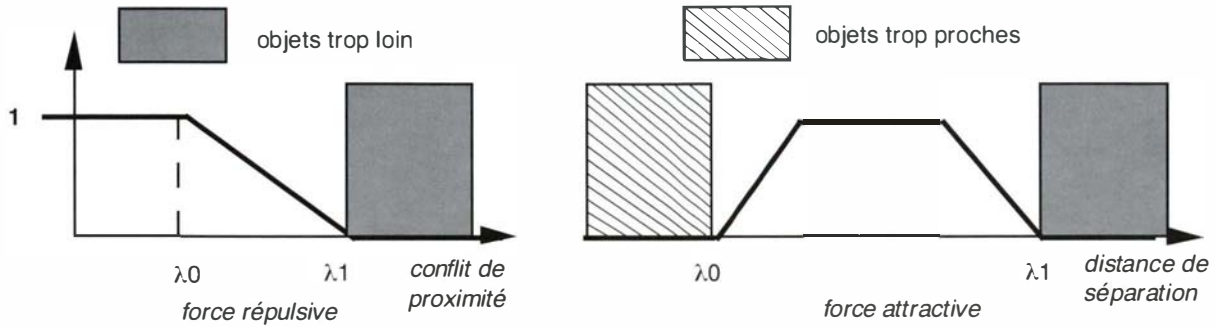


figure B.3.3.2 : amortissement des forces d'attraction et de propagation

### Agrégation des forces

Le déplacement en un nœud est calculé par l'agrégation des forces portées par les arcs de la triangulation liés à ce nœud. Nos hypothèses d'agrégation des forces sont les suivantes:

1 - les forces de même direction sont dues à la même cause. Elles sont moyennées avec un poids en fonction de l'importance du conflit.

2 - les forces de directions différentes sont dues à des forces différentes et sont additionnées.

Dans les cas intermédiaires, le choix de la méthode d'agrégation n'est pas guidé par une logique particulière. On choisit donc d'identifier la force la plus forte, de la moyenner avec la projection des autres forces dans sa direction et de l'additionner avec les résultantes des forces dans sa direction orthogonale.

### Prise en compte des densités: introduction des directions d'échappement

En fonction des configurations, on peut rencontrer des cas où la densité d'information est localement trop forte pour permettre le déplacement d'un objet dans la direction calculée sans créer de nombreux conflits, notamment avec les lignes fixes. Dans ce cas on introduit un modèle de forces d'attraction afin de déplacer les objets vers les zones de faible densité. Les densités sont calculées par dilatation progressive des objets surfaciques et linéaires et identification du centre des zones vides. Les vecteurs sont dirigés du centre des objets isolés aux centres des zones vides. Leur norme est inversement proportionnelle aux distances de séparation.



figure B.3.3.3 : introduction des directions d'échappement

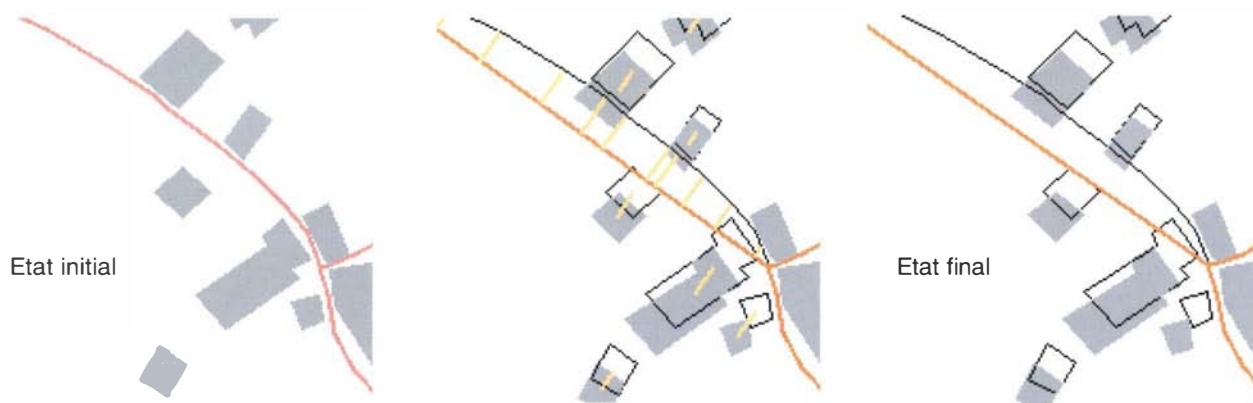
Ce travail est en cours de développement.



## Synthèse du processus global de propagation

Le processus de déplacement est donc le suivant :

- 1 - Détection d'une zone de propagation autour de la ligne modifiée,
- 2 - Identification de la densité locale pour définir si la propagation peut fonctionner ou si il faut réaliser un pré-traitement,
- 3 - Calcul des relations de proximité via une triangulation évaluée par les distances et calcul des vecteurs de déplacement initiaux,
- 4 - Calcul du déplacement en chaque nœud :
  - 4.1 - détection des contraintes de proximité et choix du meilleur nœud,
  - 4.2 - calcul des forces d'attraction et de répulsion avec amortissement,
  - 4.3 - agrégation des forces en fonction des directions,
  - 4.4 - contrôle des violations de contraintes et introduction si besoin des directions d'échappement,
  - 4.5 - mise à jour des nouvelles distances entre objets.
- 5 - Contrôle global de la nouvelle situation.



Calcul et propagation des vecteurs de déplacement.  
Déplacement de maisons après simplification de la géométrie d'une route. BDTopo

## Conclusion

Cette méthode déplacement permet d'éviter les corrections interactives après l'application d'un algorithme de généralisation tel qu'un lissage. Elle pourra être étendue à d'autres types de déplacements, dont ceux dus à la symbolisation ou à l'agrandissement d'objets. Elle repose sur une représentation plus riche des relations spatiales entre objets. On sait déjà que certaines configurations seront problématiques et ne seront pas forcément prévisibles. Il est donc essentiel d'intégrer des outils de contrôle visant à les identifier. Cette méthode de déplacement ne sera certainement pas la meilleure pour résoudre tous les problèmes de proximité: de même qu'il n'y a pas un seul algorithme de simplification de lignes, il n'y aura pas une seule méthode de déplacement d'objets.

## Références

- [BAEIJIS et al 96] Baeijs C., Demazeau Y. et Alvares L. SIGMA 1996 Application of Multi-Agent systems to cartographic generalization *Proceeding MAAMAW, 1996*.
- [BUNDY et al 95] Bundy G.L., Jones C.B. et Furse E. 1995 Holistic generalization of large-scale cartographic data in Müller et al *GIS and Generalization* London : Taylor & Francis, pp. 106-119, 1995.
- [JAGER 91] Jäger E 1991 Investigations on automated feature displacement for small scale maps in raster format *Proceedings, ACI* pp. 245-256 Bournemouth (UK), 1991.
- [LICHTNER 79] Lichtner W. 1979 Computer-Assisted processes of cartographic generalization in topographic maps. *Geo-Processing*. Vol. 1, pp. 183-199, 1979.
- [MACKANESS 94] Mackaness W 1994 An algorithm for conflict identification and feature displacement in automated map generalization *International Journal of the Cartographic and Geographical Information System* 21(4), pp. 219-232, 1994.
- [NICKERSON 88] Nickerson BG 1988 Automatic cartographic generalization for linear features *Cartographica* 25(3) p 15-66
- [TALLIS 95] Tallis M 1995 The development of a graphical user interface for interactive feature displacement *MS dissertation* Unpublished Dept of Geography Edinburgh, Scotland, 1995.

## Publications

- [RUAS 95] Ruas A 1995 Multiple paradigms for automating map generalization: geometry, topology, hierarchical space partitioning and local triangulation *Proceedings Auto Carto 12*, pp 69-78 Charlotte (USA), 1995.
- [RUAS 95] Ruas A 1995 *Formalismes pour l'automatisation de la généralisation: métrique, topologie, partitionnement hiérarchique et triangulation locale*, Proceedings ACI, pp. 950-960 Barcelone, Espagne, 1995.



## **B.4.1 Le système DORIS : applications actuelles à l'IGN et perspectives d'avenir**

*par Pascal Willis*

### **Introduction**

Le système DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré sur Satellites) est un système français de géodésie spatiale conçu et réalisé par le CNES, en collaboration avec l'IGN dans le cadre du GRGS. Conçu au départ pour l'orbitographie précise de satellites bas, et en particulier pour la mission franco-américaine Topex/Poseidon, ce système permet aussi d'importantes applications pour le positionnement précis de balises fixes au sol ainsi que pour la détermination du champ de gravité terrestre.

Après avoir rappelé très succinctement les principes de base du système DORIS, ainsi que l'état d'avancement des travaux de recherche à l'IGN (replacés dans leur contexte mondial), nous présenterons les différents axes possibles d'évolution de ce système pour l'avenir.

Enfin, tenant compte de l'omniprésence actuelle du système américain GPS (Global Positioning System) pour l'ensemble des applications géodésiques et topographiques, nous nous interrogerons sur la place que pourrait avoir le système DORIS par rapport au système GPS pour les applications géodésiques: concurrentialité ou complémentarité des deux systèmes?

### **Présentation générale du système DORIS: Contexte et objectifs**

Le but initial du système DORIS étant la poursuite de satellites bas (altitude d'environ 1000 km), ainsi que la détermination précise de leur trajectoire, il est important de disposer d'un réseau de poursuite permanent au sol aussi dense et homogène que possible. Ce réseau permanent d'orbitographie, mis en place et maintenu par l'IGN au SIMB (Service d'Installation et de Maintenance des Balises) comporte depuis plusieurs années, cinquante stations réparties de manière aussi homogène que possible à la surface terrestre [SIMB, 1996]. La qualité de ce réseau d'orbitographie (densité, homogénéité, permanence) est l'un des points clés du succès du système DORIS.

Le système DORIS est un système de géodésie spatiale de type ascendant: les mesures sont faites par le(s) satellite(s) à partir des signaux émis par des balises au sol. Cette conception originale, analogue à celle du système de localisation et de transmission de données ARGOS, permet une centralisation naturelle des mesures et facilite ainsi leur récupération au centre de calculs d'orbitographie à Toulouse. Sans entrer trop en détail dans la description technique de ce système, le principe de base des mesures est celui de l'effet Doppler. Comme toute mesure de géodésie spatiale, cette mesure fait intervenir plusieurs types de paramètres dont une liste très synthétique et non exhaustive est fournie dans le tableau B.4.1.1. Ces paramètres sont de nature très différente faisant appel à des aspects très différents de la géodésie spatiale : géométrie satellite-station au sol, forces agissant sur le satellite, propagation des ondes radioélectriques dans le milieu atmosphérique.

Nature du paramètre	Symbole usuel	Applications
<b>Géométrie</b>		
Position de la station au sol Position et vitesse du satellite Position du pôle instantané de la rotation terrestre	$X, Y, Z$ ou $\lambda, \phi, H$ $X_S, Y_S, Z_S, VX_S, VY_S, VZ_S$ $X_p, Y_p$	Localisation Orbitographie Rotation Terrestre
<b>Forces agissant sur le satellite</b>		
Champ de gravité terrestre Frottement Forces empiriques	$J_n, K_{n,m}, S_{n,m}$ $p$ $Y_R, Y_C, Y_L'$	Géoïde Étude de l'atmosphère
<b>Propagation des ondes radioélectriques dans l'atmosphère</b>		
Composante zénithale du retard troposphérique Retard ionosphérique	$K_{tropo}$ $\Delta P_{iono}$	Étude de l'atmosphère

**tableau 4.1.1** : liste (non exhaustive) des principaux paramètres estimables dans un calcul de géodésie spatiale et leur champ d'applications potentiel.

Chaque groupe de géodésie spatiale a sa propre spécificité et ses intérêts propres (ex. orbitographie pour le CNES [NOUËL et al, 1994], champ de gravité et localisation précise au GRGS/Toulouse [CAZENAVE et al, 1992; SOUDARIN et al, 1992; [BIANCALE, à paraître] et la localisation à l'IGN [WILLIS, BERTIGER, 1994] ou à l'Université du Texas [WATKINS, 1992]).

L'IGN a, pour sa part, développé son effort de recherche sur le système DORIS en collaboration avec le Jet Propulsion Laboratory (JPL, Pasadena, USA) dans le cadre de la mission océanographique franco-américaine Topex/Poseidon. Le logiciel américain GIPSY/OASIS, utilisé initialement pour les applications géodésiques ultra-précises du GPS, a été étendu [WILLIS, BERTIGER, 1993] afin que les mesures du système français DORIS puissent être à leur tour prises en compte. Ce logiciel étendu désormais au système DORIS est utilisé conjointement au JPL à Pasadena et à l'IGN à Saint-Mandé [YUNCK, 1994; WILLIS, 1994], ainsi que dans de nombreux autres groupes de recherche dans le monde.

Les résultats obtenus par les différentes équipes de recherche DORIS, ont amené naturellement les équipes françaises à faire une proposition officielle commune [BOUCHER et al, 1994] au Service International de la Rotation Terrestre (IERS) pour inclure DORIS comme nouvelle technique de l'IERS, au même titre que la Radio-interférométrie à très longue base (VLBI), la Télémétrie Laser (SLR et LLR) et plus récemment le système GPS. Cette proposition française a été acceptée et DORIS est inclus depuis janvier 1994 comme technique de l'IERS. Un appel d'offres international a ensuite été très largement diffusé par l'IERS pour mettre en place les bases d'une collaboration internationale efficace. Pour sa part, l'IGN a été accepté comme l'un des sept centres d'analyse, comme l'un des deux centres de données (avec le CDDIS/NASA aux USA) et comme centre unique de coordination.

## Résultats actuels DORIS pour le positionnement précis

### Positionnement DORIS

Actuellement, les applications géodésiques les plus précises sont issues d'un calcul de type dynamique et non plus géométrique. A la différence d'un calcul géométrique pour lequel la trajectoire du satellite est supposée connue (en fait calculée par un autre groupe spécialisé dans l'orbitographie précise), un calcul dynamique implique de calculer simultanément la position des stations au sol ainsi que la trajectoire du satellite (ce qui suppose de pouvoir modéliser aussi exactement que possible les forces agissant sur ce satellite).

Dans ce type d'approche, la qualité du positionnement du réseau au sol va principalement dépendre du nombre de mesures prises en compte (et donc de la durée d'observation) ainsi que des erreurs inévitables de modélisation (qualité des modèles, choix des paramètres estimés et d'une manière plus générale, de la stratégie de calcul).

### Positionnement précis DORIS pour l'IERS

L'un des objectifs principaux de l'IERS, et certainement celui qui est le plus connu actuellement dans la communauté des géodésiens, géophysiciens et topographes, est la réalisation et la maintenance d'un système géodésique mondial de référence : l'International Terrestrial Reference System (ITRS) [BOUCHER et al, à paraître].

Cela consiste à fournir à une communauté très large d'utilisateurs les positions (et maintenant les vitesses) d'environ 100 à 200 stations dans le monde, équipées d'un ou de plusieurs systèmes de géodésie spatiale déjà cités (VLBI, SLR, LLR, GPS et maintenant DORIS).

Dés 1995, le centre d'analyse DORIS de l'IGN a fourni à la section terrestre de l'IERS une *solution de position/vitesses* estimée avec le logiciel GIPSY/OASIS en fonction des mesures du seul satellite Topex/Poseïdon (environ 2 ans de mesures: d'octobre 1992 à décembre 1994) [WILLIS, 1995c]. Cette solution a été évaluée et comparée avec les autres solutions issues du système DORIS ainsi que des autres techniques de géodésie spatiale. Ces comparaisons ont montré que la solution DORIS figure en bonne place parmi les meilleurs solutions actuelles: les coordonnées des stations au sol sont déterminées à 1 ou 2 cm près [BOUCHER et al, à paraître]. Les vitesses sont elles beaucoup moins fiables à cause de la durée encore insuffisante des observations (environ 2 ans par rapport à certaines stations VLBI ayant observé de manière continue pendant plus d'une dizaine d'années).

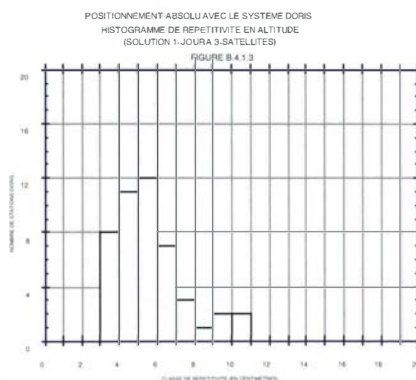
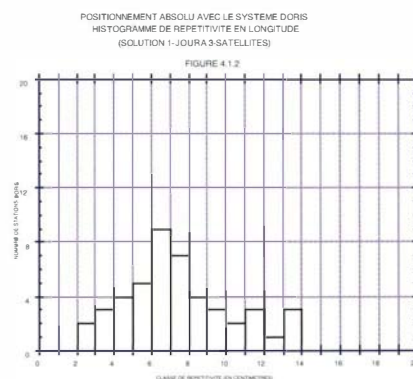
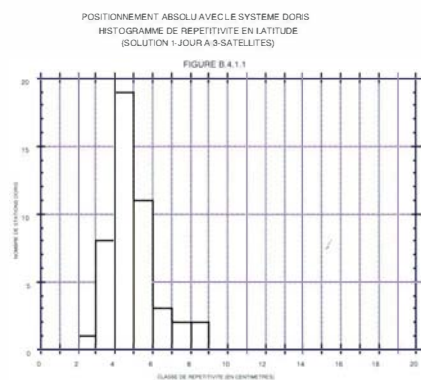
A titre d'évaluation, des solutions DORIS plus rapides avaient aussi été calculées afin d'évaluer la qualité d'un positionnement DORIS rapide (environ un jour à une semaine). Les premiers résultats avaient montré des répétitivités de la position absolue (dans un système de référence géodésique mondial) d'une station isolée d'environ 10 cm [WILLIS, 1995a]. La limitation principale des résultats étant liée au trop faible nombre de mesures pris en compte en utilisant un seul satellite.

### Positionnement DORIS multi-satellites

Afin d'améliorer ces résultats, il a été possible dès la fin 1995, de modifier encore le logiciel GIPSY/OASIS [WILLIS, 1995f] pour pouvoir traiter simultanément les mesures de tous les satellites DORIS disponibles (actuellement SPOT-2, SPOT-3 et Topex/Poseïdon). Cette approche nouvelle permet bien sûr de tripler le nombre de données sans pour autant augmenter sensiblement le nombre de paramètres puisque de nombreux paramètres sont des paramètres communs, indépendants du satellite (ex.: position et vitesse de la station au sol, position instantanée du pôle de la rotation terrestre, composante zénithale de la correction troposphérique, comportement des horloges sol ...).

Les figures 4.1.1 à 4.1.3 montrent les histogrammes de répétitivité (en latitude, longitude et altitude) obtenus récemment en observant uniquement pendant un jour l'ensemble des cinquante stations du réseau de poursuite permanent DORIS entre mai et juin 1995. On observe donc pendant deux mois la répétitivité des *solutions journalières* de chacune des cinquante stations du réseau permanent. Cela répond donc à la question simple suivante: le système DORIS donne-t-il toujours la même valeur pour les coordonnées des stations (en longitude, latitude, altitude)? Et à quelle précision?

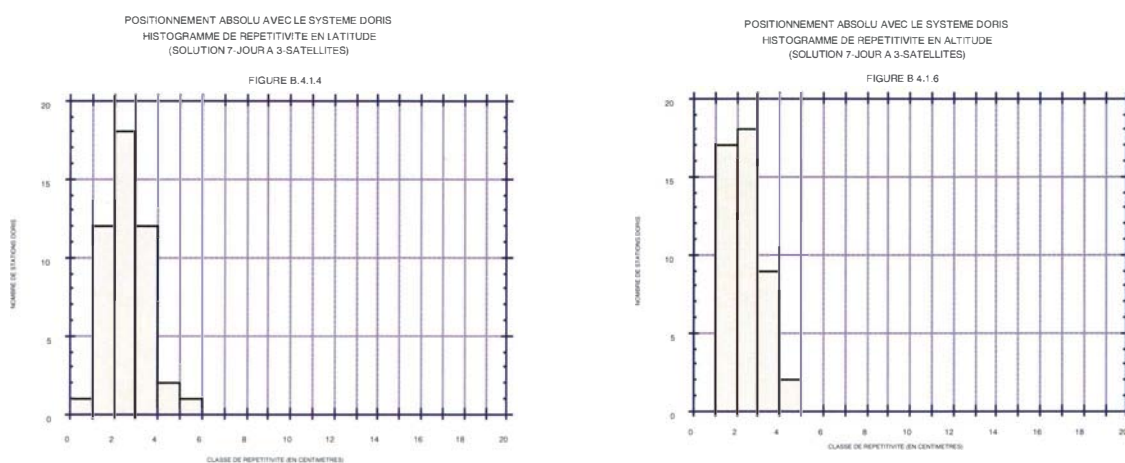
On constate que les répétitivités observées sont de l'ordre de 5 cm en latitude, de 7 cm en longitude et de 6 cm en altitude. La dispersion plus importante observée sur la composante Est (écart en longitude) est due au fait que les orbites des satellites DORIS sont proches d'orbites de type polaire et que les traces au sol sont donc principalement orientées Nord-Sud et non Est-Ouest.



On peut de plus remarquer que la composante altimétrique (altitude ellipsoïdale) est pratiquement aussi bien déterminée que la composante planimétrique. Sans entrer trop dans les détails techniques, cela est dû à la stratégie de calcul utilisée avec le logiciel GIPSY/OASIS qui permet de rajouter une contrainte temporelle sur l'évolution du paramètre troposphérique (composante zénithale du retard troposphérique) [WILLIS, 1994]. Ceci est plus proche de la réalité physique du phénomène de propagation dans l'atmosphère. De plus, cette stratégie permet de découpler (au sens des moindres carrés) ce paramètre de la composante altimétrique de la station au sol.

Les figures 4.1.4 à 4.1.6 montrent les histogrammes de répétitivité (en latitude, longitude et altitude) obtenus en observant pendant une semaine pour l'ensemble des cinquante stations du réseau de poursuite permanent DORIS. Dans ce cas, les répétitivités observées sont de 2,5 cm en latitude, 3 cm en longitude et 2,5 cm en altitude. On constate toujours, pour les mêmes raisons, que la précision en longitude est encore un peu moins bonne que celle obtenue en latitude.

On voit donc qu'observer plus longtemps (et donc accumuler plus de mesures DORIS par stations) permet d'améliorer rapidement la qualité du positionnement DORIS au niveau de 2 à 3 cm en quelques jours.



Le choix de la semaine est un peu arbitraire et ne correspond à aucun critère objectif pour le système DORIS. On a simplement choisi la durée d'une semaine pour pouvoir se comparer plus facilement avec les nouvelles solutions GPS rapides du service international IGS, qui sont calculées pour des durées d'une semaine.

Ces résultats récents montrent clairement qu'il n'est plus actuellement nécessaire d'observer plusieurs mois ou plusieurs années pour obtenir des précisions centimétriques. Quelques semaines ou quelques mois suffisent. Inversement, pour la prochaine solution IERS (qui sera donc calculée en 1996), cette approche multi-satellites sera prise en compte. Cela permettra certainement d'affiner encore les positions (et surtout les vitesses) du réseau permanent DORIS. En particulier, de détecter beaucoup plus rapidement des balises ayant un comportement douteux (exemple: antenne déplacée physiquement, oscillateur moins performant, problème géologique local, etc..).

A titre d'essai, un premier calcul montre que deux solutions mensuelles DORIS consécutives (mai et juin 1995) sont cohérentes au niveau du centimètre (résidu moyen quadratique de 1,2 cm). L'écart maximal observé sur l'ensemble des cinquante stations est de 3,4 cm. Il est donc urgent de retraiter l'ensemble de toutes les données DORIS disponibles en utilisant cette nouvelle stratégie de calculs multi-satellites.

## Les autres applications du système DORIS

### Orbitographie précise des satellites bas

Un des succès les plus importants du système DORIS est d'avoir pu répondre parfaitement aux besoins français d'orbitographie de satellites bas. Une première démonstration expérimentale dès 1990, avec le satellite SPOT-2 a permis de montrer la faisabilité de ce nouveau système, ainsi que d'affiner les stratégies de calcul et l'amélioration des modèles (en particulier, celui le modèle de champ de gravité terrestre, dont la qualité est primordiale pour toutes les applications sur satellites bas).

La mission Topex/Poseïdon a vraiment fourni une démonstration éclatante des performances du système DORIS. Ce système, grâce à sa couverture mondiale homogène et à la qualité des instruments au sol et à bord, permet d'obtenir des résultats au niveau de 2 à 3 cm pour la composante radiale, soit au même niveau que les techniques les plus précises (télémétrie Laser) [NOUËL et al, 1994]. La qualité des résultats est exprimée pour la composante radiale, car c'est principalement celle qui intéresse les océanographes qui souhaitent pouvoir utiliser ensuite les mesures de l'altimètre radar embarqué à bord du satellite.



L'IGN pour sa part a démontré le même type de performances [WILLIS, 1994], en comparant l'orbite Topex obtenue avec les mesures DORIS seules (et le logiciel GIPSY/OASIS), avec l'orbite obtenue de manière indépendante à l'Université du Texas avec les mesures GPS seules (et un logiciel différent appelé UTOPIA).

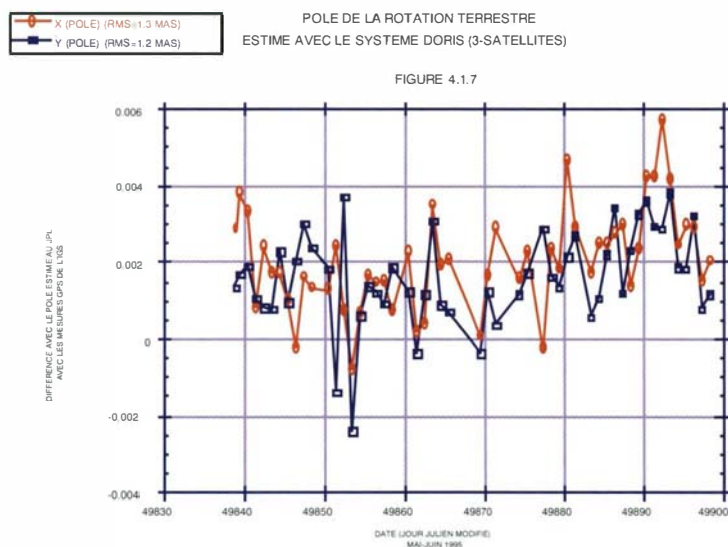
### Détermination de la rotation terrestre

L'un des objectifs principaux du Service International de la Rotation Terrestre (IERS) est la détermination de la rotation terrestre et en particulier de la position exacte de l'intersection de l'axe instantané de la rotation avec la croûte terrestre.

La première solution IGN/DORIS soumise en 1995 [WILLIS, GAMBIS, 1995] a permis de constater que cette série de positions journalières du pôle, obtenue uniquement à partir des mesures DORIS sur Topex/Poseïdon possédait une exactitude d'environ 2 milliarcseconde (mas), ce qui représente environ 5 cm sur la croûte terrestre. Ces résultats sont encore assez éloignés de ceux obtenus avec GPS par les groupes d'analyse les plus avancés dans le monde qui obtiennent eux des résultats d'environ 0,3 mas (grâce à l'importante constellation des satellites GPS).

Toutefois, une première solution obtenue fin 1995 [WILLIS, 1995f], en utilisant les trois satellites DORIS disponibles, montre que des exactitudes de l'ordre de 1,3 mas sont désormais accessibles avec le système DORIS dès à présent.

La figure 4.1.7 montre l'écart entre la position du pôle estimée à partir des solutions journalières DORIS multi-satellites et la solution obtenue au JPL en traitant les données GPS journalières du service IGS (International GPS Service for Geodynamics). Ces écarts sont exprimés pour la composante X ainsi que la composante Y du pôle. La solution GPS possédant une exactitude estimée d'environ 0,3 mas, elle peut donc parfaitement être considérée comme une référence externe que l'on peut supposer parfaite. Les écarts observés sur les solutions DORIS sont de l'ordre de 1,3 mas et les biais (dus à une très légère différence de réalisation des systèmes de référence sous-jacents à ces deux séries du pôle) sont aussi de l'ordre de la milliseconde d'arc.



### Détermination du champ de gravité terrestre

L'un des aspects fondamentaux du système DORIS est de déterminer la trajectoire précise de satellites bas. Ces trajectoires étant fortement perturbées par les irrégularités du champ de gravitation terrestre, elles sont parfaitement adaptées pour essayer de modéliser ce champ. Il faut noter que jusqu'à présent, chaque nouveau modèle de champ a permis d'améliorer (à peu de frais) les résultats DORIS pour l'orbitographie, comme pour la localisation.

DORIS à lui seul ne peut être utilisé pour ces modèles, puisqu'il faut utiliser le plus grand nombre de mesures possibles, en utilisant des satellites d'altitude et d'inclinaisons différentes. Toutefois, c'est une des données importantes pour ces types de calculs [BIANCALE et al, à paraître] .

### Contrôle et calibration des autres systèmes de géodésie spatiale

Une vue un peu simpliste des problèmes de géodésie spatiale pourrait faire penser qu'à terme un seul système survivra et supplantera l'ensemble des autres, ne serait-ce que pour tenir compte de considérations financières. Toutefois, dans tous ces aspects très proches de la métrologie, il est essentiel de disposer de plusieurs types de systèmes voire de plusieurs méthodes différentes.

En particulier, certains paramètres de géodésie spatiale sont trop souvent éliminés sans être réellement analysés. Sans entrer trop avant dans les détails techniques, c'est le cas par exemple de la composante zénithale de la correction troposphérique [WILLIS, 1994], du coefficient de frottement atmosphérique, ou d'erreurs d'orbites empiriques à la période orbitale [CRETAUX et al, 1994]. Ce sont des paramètres internes qui doivent être estimés dans le calcul mais dont l'intérêt n'apparaît pas de manière immédiate. Toutefois, tous ces paramètres ont une signification physique réelle. Lorsque l'on commence à mélanger des mesures de plusieurs satellites, voire de plusieurs techniques, ces paramètres doivent rester constants sans engendrer de nouveaux systématismes. L'étude sur le long terme, entamée à l'IGN [WILLIS, 1994], dans le cadre de la mission Topex/Poseidon a été particulièrement riche d'enseignement et a permis d'améliorer progressivement la qualité du positionnement DORIS en comprenant mieux les erreurs systématiques internes.

Pour DORIS, cet aspect de contrôle et de calibration des autres systèmes de géodésie spatiale est loin d'être marginal et peut en soi, être à lui-seul, une justification de l'existence de ce système.

## **DORIS et GPS : compétition ou complémentarité?**

Actuellement, à cause de l'importance des applications géodésiques et topographiques du système GPS et de la révolution que ce système a créé au cours des dernières années pour la géodésie, il est devenu impossible de parler d'un nouveau système sans le comparer au système GPS.

DORIS, pour sa part est un système assez particulier : le système étant ascendant, les données sont centralisées au niveau du satellite (et non du récepteur au sol comme cela est plus classique). Cela créé beaucoup d'avantages pour les groupes calculant l'orbite des satellites, ou ceux calculant les positions du réseau de poursuite permanent DORIS, puisque la totalité des mesures arrive automatiquement (et à faible coût financier) à ces centres d'analyse.

Toutefois, cela créé aussi certaines contraintes pour les utilisateurs, et en particulier pour les nouveaux utilisateurs. En effet, le système étant ascendant, ce sont les balises au sol qui émettent le signal (et ceci de manière continue et omnidirectionnelle). Lorsque deux balises se trouvent dans une même zone (typiquement de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres), il y a risque d'interférence au niveau de la réception par le satellite. Par une technique simple de séquençement (chaque balise émet chacune à son tour), il a été permis d'augmenter de manière significative le nombre de balises dans une même zone. Toutefois, cette technique est vite limitée (six balises semble actuellement être un maximum) car le nombre de données observées par balises diminue aussi rapidement (en raison inverse du nombre de balises à proximité).

Il ne faut donc pas essayer de concurrencer le système GPS sur le créneau de la rapidité de positionnement et du nombre d'utilisateurs, mais plutôt trouver les domaines particuliers (scientifiques ou commerciaux) pour lesquelles le système DORIS serait le plus adapté. Le CNES a délégué la commercialisation des applications commerciales de positionnement à sa filiale CLS/ARGOS déjà en charge du système ARGOS.

En l'état actuel des performances du système, voici quelques applications, pour lesquelles le système DORIS semble mieux adapté que le système GPS pour la localisation :

- *surveillance géophysique* du réseau permanent des cinquante stations DORIS : la permanence, la continuité et l'automatisation complète de ces stations sont un avantage conséquent du système DORIS. Cette application peut d'ailleurs s'étendre à toutes les autres applications de type surveillance géophysique (lorsque les problèmes de saturation du système auront été levés (voir plus loin). L'un des aspects importants est que le coût de fonctionnement pour l'utilisateur est potentiellement très faible (on n'a pas besoin de retransmettre les données en temps quasi réel). L'utilisateur peut accéder directement aux résultats de positionnement.

- *détermination ultra-précise de la position d'un point isolé* dans un système de référence mondial. Dans le cas de GPS, la manière naturelle est de se rattacher à un autre point. Plus le point de référence est lointain, plus les conditions d'observations et de calculs sont contraignantes pour l'utilisateur (plusieurs jours d'observations et logiciel de plus en plus délicat à manipuler, surtout pour des non professionnels). En particulier, cela concerne les réseaux géodésiques encore mal déterminés (Afrique, îles isolées, etc...) ou certains réseaux géophysiques locaux (Asie). Il est possible d'envisager aussi des solutions mixtes DORIS/GPS : on pourrait par exemple réaliser entièrement ces réseaux par GPS, mais en s'appuyant sur un point ou plusieurs points DORIS qui permettraient de recalibrer le réseau GPS dans un système de référence mondial centimétrique.

- *détermination rapide (moins d'un jour) d'une position sub-métrique* (voir décimétrique). L'avantage est que l'utilisateur dispose directement des résultats de positions et n'a besoin d'aucune compétence ou effort particulier pour obtenir ce résultat à partir des mesures. Dans certains cas, un point de référence même métrique peut être utile (par exemple, pour l'exploration pétrolière dans certaines zones à l'étranger).

## Perspectives d'évolution du système DORIS

Il est important de mentionner que le CNES a d'ores et déjà entrepris des études pour améliorer le fonctionnement ainsi que les performances du système. Plusieurs améliorations possibles sont envisagées actuellement :

- *augmentation du nombre de satellites*. Comme nous l'avons vu le nombre de satellites permet d'améliorer la qualité des résultats de positionnement, mais surtout d'obtenir plus rapidement le même résultat. Plusieurs satellites du CNES sont déjà programmés et comporteront un récepteur DORIS à bord: SPOT-4, SPOT-5, ENVISAT, TPFO.

- *développement instrumentaux*. Plusieurs voies sont actuellement envisagées, dont deux sont particulièrement importantes. La première concerne la possibilité de disposer de récepteurs encore plus précis (bruits de mesures réduits). La deuxième, qui constituerait vraiment une révolution technologique serait de modifier légèrement le fonctionnement du système (récepteurs multi-canaux à bord des satellites, balises multi-fréquences, codage), ce qui lèverait tous les problèmes de saturation du système dans une même zone. L'aspect surveillance du système DORIS pourrait alors vraiment se développer en concurrence avec le système GPS.

- *développement logiciels*. Même si des améliorations importantes ont déjà été obtenues par les différents groupes provenant d'amélioration des calculs (et non de celles des données elles-mêmes qui ne sont souvent que retraitées), il est encore envisageable que de nouveaux développements améliorent encore la qualité des résultats: améliorations de modèles, comme de nouveaux champs; ou détermination de nouvelles stratégies de calculs (nouveaux paramètres estimés, ou contraintes spatio-temporelles supplémentaires pour certains paramètres, estimations combinées ...).

### Conclusion

En conclusion, 1995 a été une année particulièrement importante pour le système DORIS. L'inclusion de ce système comme nouvelle technique de l'IERS est une reconnaissance implicite des autres groupes de géodésie spatiale des capacités de ce système pour la localisation précise, la détermination de la rotation terrestre et l'orbitographie.

En particulier, pour l'équipe IGN, les calculs DORIS multi-satellites ont montré qu'il est désormais possible d'obtenir des performances centimétriques en très peu de temps (quelques jours à une semaine), ainsi qu'une position instantanée du pôle de rotation terrestre proche du milliseconde d'arc.

Enfin, de nouveaux développements instrumentaux déjà programmés au CNES laissent présager que les applications de type surveillance géophysique, pour lesquelles le système DORIS semble mieux adapté en terme de coût à long terme que le système GPS, pourraient se développer dans les années à venir.

### Références

- [BIANCALE]. *Long wavelength global gravity field models* : GRIM4\_S4, GRIM4-C4, soumis à J. of Geodesy
- [BLEWITT G., M. HEFLIN, W. BERTIGER, F. WEBB, U. LINDQUISTER, R. MALLA, 1992]. *Global coordinates within centimeter accuracy in the International Terrestrial Reference Frame using GPS*, Geophys. Res. Lett., 19, pp. 853-856, 1992.
- [BOUCHER C., Z. ALTAMIMI, M. FEISSEL, P. SILLARD]. *Results and Analysis of the ITRF 94*, Note Technique IERS n°20, à paraître.
- [CAZENAVE A., J.J. VALETTE, C. BOUCHER]. *Positioning results with DORIS on SPOT-2 after a first year of mission*, J. Geophys. Res., 97, 7109-7119, 1992.
- [CRÉTAUX J.-F., F. NOUËL, C. VALORGE, P. JANNIERE, 1994]. *Introduction of empirical parameters deduced from Hill's equations for satellite orbit determination*, Manuscr. Geod., 19, 135-156, 1994.
- [NOUËL F., J.P. BERTHIAS, M. DELEUZE, A. GUITART, P. LAUDET, A. PIUZZI, D. PRADINES, C. VALORGE, C. DEJOIE, M.F. SUSINI, D. TABURIAU, 1994]. *Precise CNES orbits for Topex/Poseidon*, J. of Geophys. Res., Topex/Poseidon, 99, C12, Dec. 15, 1994.
- [SIMB]. *Service d'Installation et de Maintenance des Balises DORIS, État du réseau orbitographique DORIS*, édition du 1/1/96, CNES CT/ED/TU/TD n°96.108, 1996.
- [SOUDARIN L., A. CAZENAVE]. *Global geodesy using DORIS data*, Geophys. Res. Lett., 1992.
- [WATKINS M. J.C. RIES, G.W. DAVIS, 1992]. *Absolute positioning using DORIS tracking of SPOT-2*, Geophys. Res. Lett., 19, pp. 2039-2042.

## Publications

- [BERTIGER W.I., Y.E. BAR-SEVER, E.J. CHRISTIENSEN, E.S. DAVIS, J.R. GUINN, B.H. HAINES, R.W. IBANEZ-MEIER, J.R. JEE, S.M. LICHTEN, W.G. MELBOURNE, R.J. MUELLERSCHOEN, T.N. MUNSON, Y. VIGUE, S.C. WU, T.P. YUNCK, B.E. SCHUTZ, P.A.M. ABUSALI, H.J. RIM, N.M. WATKINS, P. WILLIS, 1994]. GPS precise tracking of Topex/Poseidon: Results and implications, *J. of Geophys. Res.*, Topex/Poseidon, 99, C12, pp. 24449-24464, Dec. 15, 1994.
- [BONDARENCO N., 1995]. Estimation du délai troposphérique dans le traitement des données DORIS, Rapport d'étude, IGN/LAREG, Octobre 1994.
- [BOUCHER C., A. CAZENAVE, J.-P. DUFOUR, N. ESSAÏFI, M. FEISSEL, D. GAMBIS, P. WILLIS, 1994]. Proposal to include DORIS as a new technique in IERS, Rapport Technique GRGS, RT n° 12, Mars 1994.
- [DUFOUR J.P., C. BOUCHER, P. WILLIS, M. GAVORET, M. LANSMANN, 1992]. Localisation Géodésique à l'aide du système DORIS, Journée Recherche de l'IGN, Février 1992, IGN CC/G n° 568
- [WILLIS P., C. BOUCHER, 1988]. Rattachement des marégraphes au système géodésique mondial BTS par les systèmes GPS et DORIS, Journée systèmes de référence spatio-temporels, Paris, Septembre 1988, IGN CC/G n° 537.
- [WILLIS P., C. BOUCHER, J.P. DUFOUR, 1993]. Intercomparaisons GPS et DORIS dans le cadre de la mission océanographique Topex/Poseidon - Résultats préliminaires-, Journée Recherche de l'IGN, Saint-Mandé, Mars 1993, IGN CC/G n° 586.
- [WILLIS P., W. BERTIGER, 1993]. Recent DORIS data processing results using the GIPSY-OASIS II software, JPL Interoffice Memorandum, 335.8-93-005, Avril 1993.
- [WILLIS P., W. BERTIGER, 1994]. 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, Janvier 1994, IGN CC/G n° 596
- [WILLIS P., 1994]. Le système DORIS: Résultats récents de la mission océanographique Topex/Poseidon, Journée Recherche de l'IGN, Mars 1994, IGN CC/G n° 597
- [WILLIS P., 1995a]. DORIS nouvelle technique de l'IERS, Journée de la Recherche IGN, Saint-Mandé, 20-21 mars 1995, IGN/LAREG CM004.
- [WILLIS P., 1995b]. DORIS nouvelle technique de l'IERS: Apport à l'altimétrie radar, réunion préparatoire au Science Working Team Topex/Poseidon de Biarritz, Toulouse, 24 avril 1995, IGN/LAREG CM014.
- [WILLIS P., 1995c]. DORIS nouvelle technique de l'IERS, Compte-rendu d'activité, Conseil Scientifique National du Bureau Central de l'IERS, Paris, 26 avril 1995, IGN/LAREG CM 015.
- [WILLIS P., 1995d]. Script TIESTA: Creating a STACOV file containing the local tie information (position and velocity), Mai 1995, IGN/LAREG MM07.
- [WILLIS P., 1995e]. DORIS and the IERS Terrestrial Reference Frame: Open questions and comments, ITRF workshop, Saint-Mandé, 8-9 mai 1995, IGN/LAREG CM013.
- [WILLIS P., D. GAMBIS, 1995]. Polar motion derived from DORIS technique, IERS Workshop, Paris, 10-12 mai, 1995, IGN/LAREG CM012.
- [WILLIS P., 1995f]. Compte-rendu de mission au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA, 30 novembre- 8 décembre 1995, IGN/LAREG CR002.
- [YUNCK T., W.I. BERTIGER, S.C. WU, Y. BAR-SEVER, E.J. CHRISTIANSEN, B.J. HAINES, S.M. LICHTEN, R.J. MUELLERSCHOEN, Y. VIGUE, P. WILLIS, 1993]. First assesment of GPS-based reduced dynamic orbit determination on Topex/Poseidon, *Geophys. Res. Lett.*, 1994, 21, 7, 541-544, IGN CC/G n° 608.



## B.4.2 Le géoïde des Alpes françaises méridionales

par Henri Duquenne et Zhiheng Jiang

### Introduction

La détermination précise du géoïde gravimétrique dans les Alpes françaises est considérée jusqu'aujourd'hui comme une entreprise difficile. En raison du relief tourmenté, il est nécessaire d'utiliser des méthodes performantes, qui n'étaient pas disponibles au moment de précédentes tentatives, comme on peut le lire dans [LEVALLOIS 71a], [DELOMENIE 87], [BALMA et al 92].

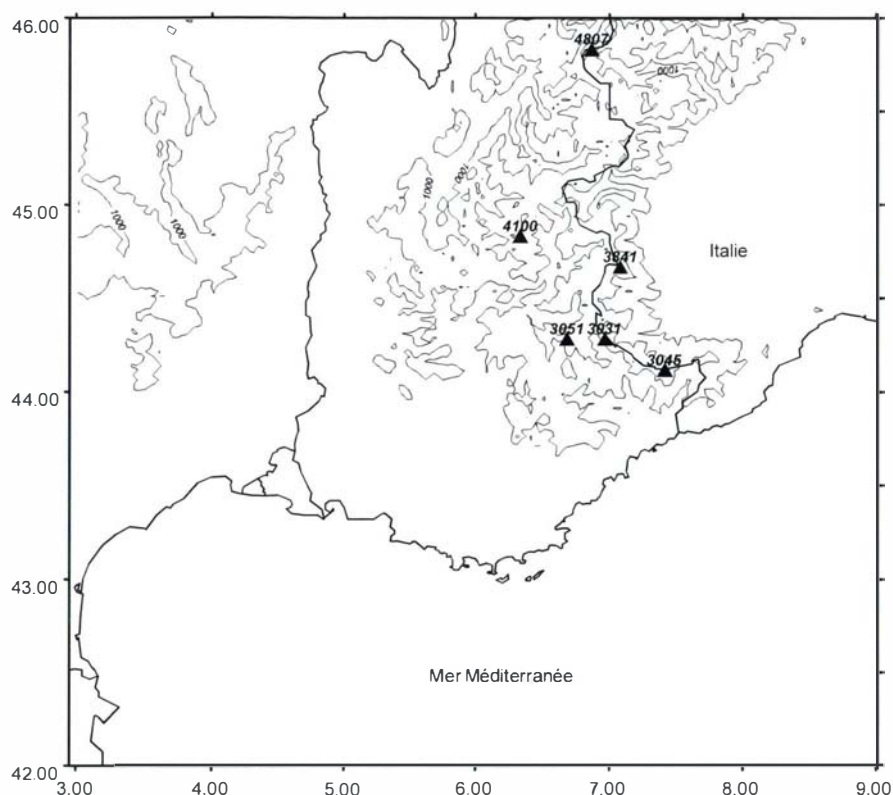
Ce problème est maintenant résolu grâce aux techniques de retrait-restauration implémentées sur des ordinateurs puissants.

D'autre part, l'évaluation de la qualité des résultats était une opération hasardeuse [LEVALLOIS 71b]. Le développement du Global Positioning System associé au nivellement classique fournit désormais un outil efficace pour comparer les ondulations du géoïde obtenues par intégration d'anomalies de pesanteur à des valeurs ponctuelles issues de nivellement et GPS.

Le troisième obstacle sur la voie d'un géoïde alpin précis est, comme on va le voir, la distribution très irrégulière des données gravimétriques. Cependant, la détermination du géoïde dans cette région est une tâche intéressante à plus d'un titre. En l'entreprenant, les buts des auteurs étaient les suivants :

- Participer aux tests et comparaisons méthodologiques, en coopération avec le Bureau Gravimétrique International, avant le calcul d'un géoïde couvrant la France entière,
- Comparer des réalisations gravimétriques du géoïde avec un réseau de points GPS nivelés, dans une région où chacune des méthodes présente des faiblesses particulières,
  - Evaluer les performances du nivellement par GPS en zone montagneuse,
  - Estimer les possibilités de détection des fautes sur les coordonnées verticales dans les réseaux GPS,
  - Recenser les problèmes liés à la fusion de données françaises et étrangères.

La figure B.4.2.2 (page suivante) montre la situation de la zone test et la topographie régionale. Le point culminant dans le modèle numérique de terrain est le Mont-Blanc (4807 m), et plusieurs sommets excèdent 3000 mètres en altitude (Mont Viso, 3841 m, etc.) dans la zone même où le géoïde a été calculé.



**figure B.4.2.2 :** topographie régionale. Equidistance des courbes 1000 m. Quelques sommets importants sont représentés.

## Calcul du géoïde gravimétrique

### Les données et leur préparation

Les données comprennent un modèle global de champ, un modèle numérique de terrain et des valeurs ponctuelles de la pesanteur.

Le modèle de potentiel utilisé est OSU91A, développé en harmoniques sphériques au degré et à l'ordre 360. Il résulte du traitement combiné de mesures de géodésie spatiale, de gravimétrie et d'altimétrie par satellite [RAPP et al 91].

Les données gravimétriques ont été gracieusement fournies par le Bureau Gravimétrique international (BGI), qui en assure la validation [TOUSTOU 91]. Un sous ensemble de 2769 valeurs a été extrait en fixant une distance minimale de 4 km entre les points. Les altitudes des stations gravimétriques ont été vérifiées par comparaison au modèle numérique de terrain décrit ci-dessous. En Méditerranée, seules les valeurs de la pesanteur mesurées à la surface de la mer ont été prises en considération. La figure B.4.2.3 montre la couverture gravimétrique utilisée et les anomalies de pesanteur, c'est à dire les différences entre les valeurs réelles de  $g$  et les valeurs déduites d'un modèle dont une surface équipotentielle serait ellipsoïdique. Le tableau B.4.2.1 donne quelques statistiques. Les différentes anomalies sont définies dans le paragraphe suivant.

	Min.	Max.	Moyenne	EMQ	écart-type
$\Delta g_{FA}$	-131.33	133.41	1.10	33.05	33.03
$\Delta g_{Model}$	-108.19	135.59	24.44	38.99	30.38
$\Delta g_{RFA}$	-86.3	106.87	6.04		18.93

**tableau B.4.2.1 :** description statistique des anomalies de pesanteur (à l'air libre), du modèle OSU91A, résiduelles (unité : 1 mGal).

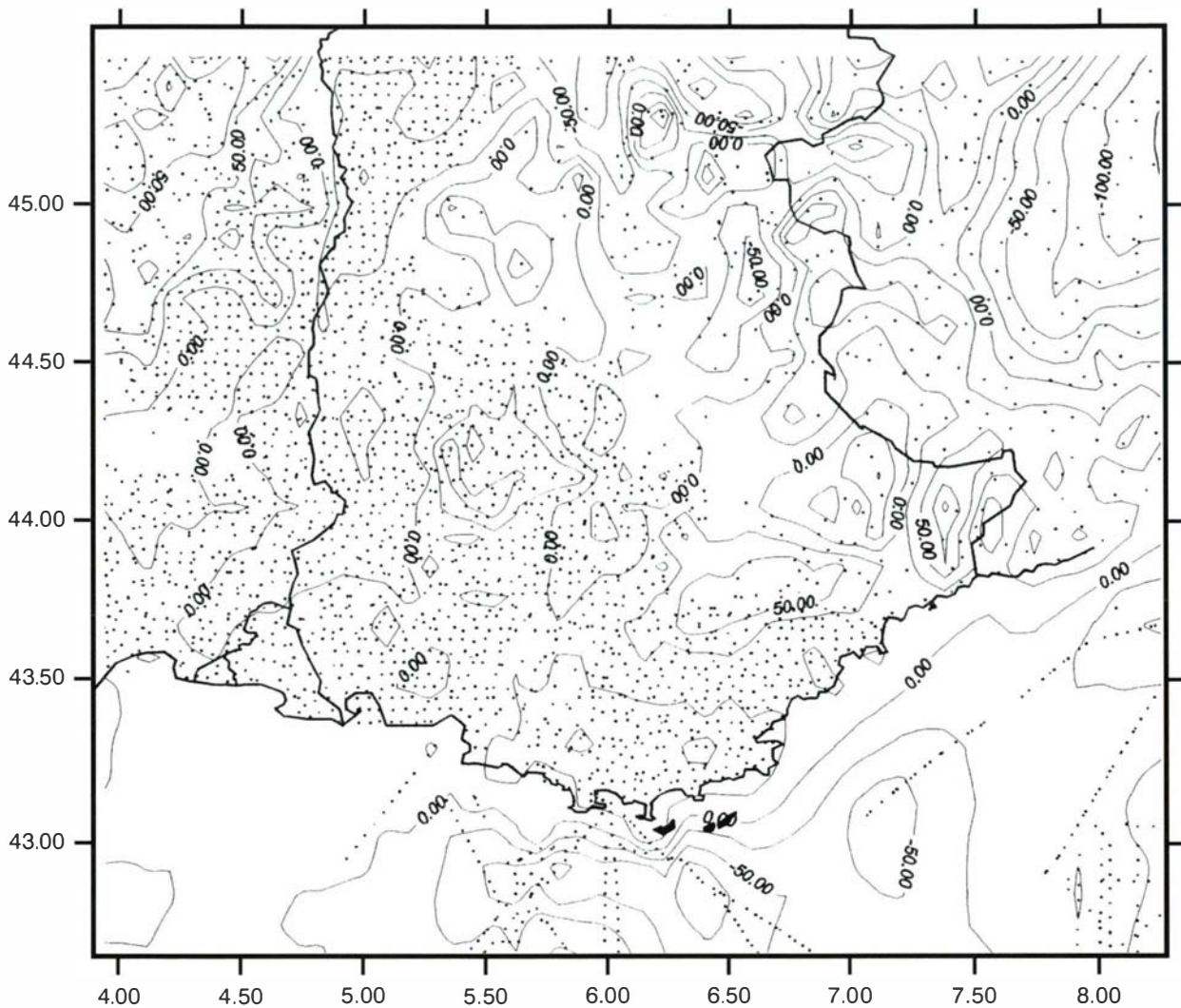


figure B.4.2.3 : points gravimétriques et anomalies à l'air libre  $\Delta g_{FA}$ . Equidistance 25 mGals.

Autour et à l'intérieur de la région intéressante, deux modèles numériques de terrain (MNT) ont été fusionnés. Le premier est une grille au pas de  $7,5'' \times 10''$  couvrant le nord-ouest de l'Italie et incluant la bathymétrie. Le second, couvrant la France, est un peu plus fin ( $4,5'' \times 6''$ ), [DUQUENNE 92], mais ne contient pas de bathymétrie. Il a donc été décidé de ne pas appliquer de correction de terrain en mer. Durant le processus de fusion, le MNT italien a été déplacé en latitude et longitude par rapport au modèle français, en vue de minimiser les écarts en altitude le long de la frontière. Ce travail fastidieux a été rendu indispensable en raison d'écarts importants entre les deux MNT dus à un décalage fortuit en planimétrie. Bien que, dans un relief aussi accidenté, toutes les méthodes d'interpolation donnent des résultats incertains, une amélioration importante a été obtenue pour la partie de frontière comprise entre  $45^\circ$  et  $46^\circ$  de latitude, où les altitudes varient entre 2000 et 4800 m : l'écart-type des différences entre les deux MNT a été réduit de 125 à 57 m. La grille fusionnée a été vérifiée par comparaison avec des cartes existantes à l'échelle de 1 : 25000. La grille finale est limitée par les parallèles  $42^\circ$  et  $46^\circ$  et par les méridiens  $3^\circ$  et  $9^\circ$  est. Elle comporte 11,5 millions de valeurs. Pour les besoins du calcul, deux autres grilles ont été déduites de la précédente : la première, à pas large ( $1,5' \times 2'$ ), est utilisée pour accélérer les processus d'intégrations au cours des corrections de terrain. La seconde est un modèle numérique de terrain filtré par simple moyenne dans une fenêtre mobile de  $30' \times 40'$  est utilisée pour calculer les réductions de terrain résiduel. La carte orographique (figure B.4.2.2) est déduite du MNT à pas large.

## Méthode de traitement : techniques d'intégration et de retrait-restauration

La hauteur du géoïde est en principe calculée par la formule de Stokes [HEISKANEN, MORITZ 67] :

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma$$

$R$  est le rayon de la Terre,  $\gamma$  est l'accélération normale de la pesanteur,  $\sigma$  est la sphère de rayon unité,  $\Delta g$  l'anomalie de pesanteur sur le géoïde,  $S(\psi)$  est la fonction de Stokes,  $\psi$  est la distance angulaire qui sépare, sur  $\sigma$ , le point de calcul du point courant d'intégration. Dans la version originale de cette formule, le champ de référence est le champ normal, dont la surface équipotentielle de référence est un ellipsoïde géocentrique. La formule n'est valide que pour autant qu'il n'y ait pas de masse au dessus du géoïde. Le domaine d'intégration est la Terre entière.

Dans les applications actuelles, le champ normal est remplacé par un modèle global développé en harmoniques sphériques. Ceci permet de modéliser les anomalies de pesanteur des régions lointaines et de réduire le domaine d'intégration à une calotte de quelques dizaines de kilomètres de rayon. D'autre part, on emploie une technique dite de retrait-restauration qui permet de tenir compte des effets du terrain tout en se plaçant dans les conditions de validité de la formule de Stokes [HEISKANEN, MORITZ 67], [SIDERIS, FORSBERG 90]. L'effet gravitationnel du terrain est retranché des anomalies de pesanteur, qui sont ensuite intégrées. Pour finir, l'effet du terrain sur le géoïde est restauré. L'emploi simultané du modèle global et de la technique de retrait-restauration induit cependant une complication : une partie de l'information sur l'effet gravitationnel de la topographie est déjà contenue dans le modèle de champ. On ne doit donc retrancher puis restaurer que les effets à hautes fréquences spatiales du terrain. C'est la raison pour laquelle on utilise un MNT filtré : on ne retranche puis ne restaure que les effets du "terrain résiduel", compris entre le terrain réel et le terrain filtré. Ces raffinements méthodologiques ont une conséquence secondaire bénéfique : celle de réduire la variabilité des anomalies de pesanteur qu'on intègre (voir tableau 1 ci-dessus). L'intégration numérique en est plus précise et plus facile. La technique de retrait-restauration employée est celle décrite dans [BALMA et al 92] et peut être résumée de la manière suivante :

- Des valeurs de  $g$ , on calcule les anomalies à l'air libre incluant la correction atmosphérique que l'on peut déduire de [MORITZ 92] :

$$\delta g_{atm} = 0,874 - 9,9 \times 10^{-5} H \quad (\text{mGal})$$

$$\Delta g_{FA} = g + \delta g_{atm} - \frac{\partial g}{\partial H} H - \gamma_0$$

$H$  est l'altitude de la station gravimétrique (en mètres) où la pesanteur mesurée est  $g$ .  $\Delta g_{FA}$  est la différence entre la pesanteur réelle réduite au niveau du géoïde (en supposant l'absence de croûte) et la pesanteur normale  $\gamma_0$  au niveau de l'ellipsoïde (celle qui serait créée par l'ellipsoïde supposé équipotentiel).

- A partir des trois modèles numériques de terrain (fin, à pas large et filtré), on calcule les effets directs et indirects du terrain résiduel :

$$\delta g_{RT} = \int_{RT} \frac{\rho (H - H_0)}{r^3} d\tau$$

$$\delta g_{IRT} \approx \frac{1}{\gamma_0} \frac{\partial \gamma}{\partial H} \delta W_{RT} = \frac{1}{\gamma_0} \frac{\partial \gamma}{\partial H} \int_{RT} \frac{G\rho}{r} d\tau$$

$\delta g_{RT}$  est la partie de l'accélération de pesanteur due à la croûte mais qui n'est pas déjà modélisée par le développement du potentiel.  $\rho$  est la masse volumique de la croûte, supposée constante ( $2670 \text{ kg m}^{-3}$ ).  $H$  est l'altitude du terrain,  $H_0$  celle du terrain filtré.  $r$  est la distance entre le point de calcul et le point courant d'intégration.  $d\tau$  est l'élément de volume.  $\delta g_{IRT}$  est l'effet indirect : si on retire la matière correspondant au terrain résiduel, on modifie le potentiel et par conséquent la position du géoïde qui devient le co-géoïde.  $\delta W_{RT}$  est le potentiel créé par le terrain résiduel.



- Utilisant le modèle global de champ, on calcule les anomalies de pesanteur du modèle sur le géoïde du modèle :

$$\Delta g_{Model} \approx g_{Model} - \gamma_0 + N_{Model} \frac{\partial \gamma}{\partial h}$$

- On calcule ensuite les anomalies résiduelles sur le co-géoïde, dont on transforme les valeurs ponctuelles en grille :

$$\Delta g_{RFA} = \Delta g_{FA} - (\delta g_{RT} - \delta g_{IRT}) - \Delta g_{Model}$$

- La hauteur résiduelle du co-géoïde peut alors être intégrée par la formule de Stokes, sur la grille désirée et sur les points GPS :

$$N_R = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\sigma} \Delta g_{RFA} S(\psi) d\sigma$$

Il s'agit en fait de la hauteur du co-géoïde au dessus du géoïde du modèle de champ.

- Des MNT, on déduit l'effet indirect du terrain résiduel sur le géoïde, c'est à dire la différence entre co-géoïde et géoïde :

$$\delta N_R = \frac{1}{\gamma} \delta W_{RT}$$

- A partir du modèle de champ et des quantités ci-dessus, on calcule la hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde :

$$N = N_{Model} + N_R + \delta N_R$$

- On calcule enfin les anomalies de Bouguer et une correction pour obtenir les anomalies d'altitude (hauteur du quasi-géoïde, c'est à dire de la référence des altitudes normales, au dessus de l'ellipsoïde) :

$$\Delta g_B = \Delta g_{FA} - 2\pi G\rho H$$

$$\zeta = N - \frac{\Delta g_B}{\gamma} H$$

Il faut noter que cette formulation est contestable : elle n'inclut pas un terme du second ordre dont [SJOBERG 95] vient de montrer l'importance.

Dans un premier calcul, les intégrations ont été exécutées par des méthodes classiques grâce aux programmes TC et STOKES du logiciel GRAVSOF [TSCHERNING et al 92]. Le MNT fin a été utilisé à des distances inférieures à 35 km du point de calcul, et le MNT à pas large jusqu'à 55 km. Ceci peut être considéré comme insuffisant, compte tenu du relief régional, mais les limites de l'ordinateur utilisé ont été atteinte. La figure B.4.2.4 illustre la solution obtenue. On y distingue clairement l'influence des grandes vallées (Rhône, Durance) et des principaux massifs sur la forme du géoïde. D'autres traitements ont été réalisés avec le logiciel "PILI" développé au LAREG [JIANG 1995]. Ce programme comporte un module d'intégration rapide des corrections de terrain et de la formule de Stokes, qui permet de réduire considérablement le temps de calcul sans perte de précision, comme le montre le tableau B.4.2.2, (ci-dessous).

Intégrale	Nombre de valeurs	Temps (classique)	Temps (rapide)	% rapide/classique
Stokes	434	0 h 01 mm 55,6 s	0 h 00 mm 17,3 s	15,0 %
Effet du terrain résiduel sur $g$	1600	4 h 40 mm 39,4 s	0 h 02 mm 01,6 s	0,7 %
Effet du terrain résiduel sur $N$	434	1 h 13 mm 19,9 s	0 h 02 mm 04,7 s	2,83 %
Total	2468	5 h 55 mm 54,9 s	0 h 04 mm 23,6 s	1,23 %

**tableau B.4.2.2 : comparaison des temps de calculs des intégrales par méthodes classiques (GRAVSOF) et rapides (PILI).**

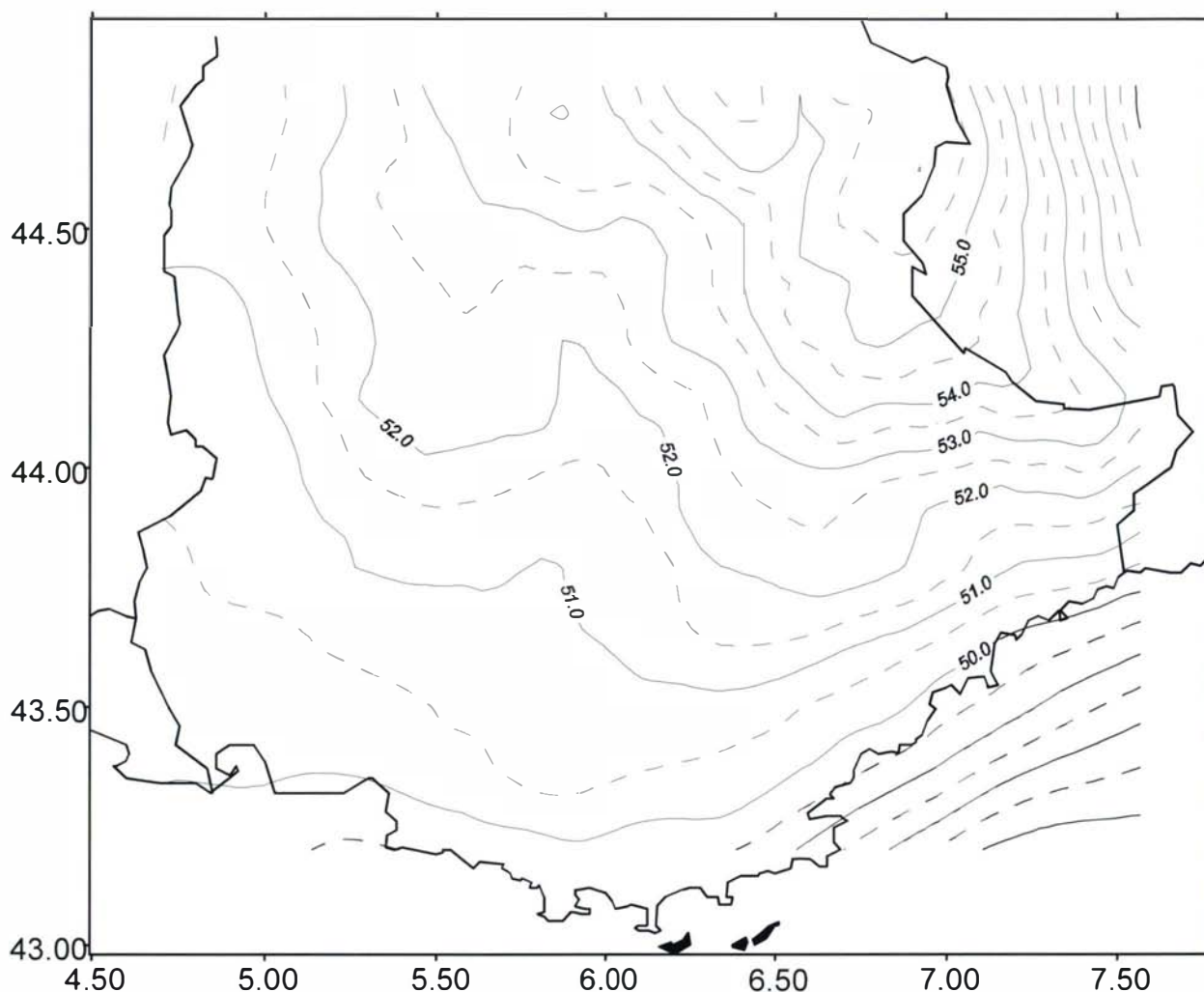


figure B.4.2.4 : le quasi-géoïde gravimétrique. Equidistance 1 m, intercalaires 0,5 m.

## Comparaison du quasi-géoïde gravimétrique et d'anomalies d'altitude dérivées de nivellement et GPS

L'Institut Géographique National réalise actuellement le Réseau Géodésique Français (RGF), pour remplacer la "Nouvelle Triangulation Française" (NTF). Le nouveau réseau comprend un réseau de référence de 23 points (RRF) et un réseau de base (RBF) de 1000 points GPS distants de 20 à 25 km. Des coordonnées provisoires sont disponibles pour les points de la moitié sud de la France continentale. Les altitudes normales de ces points ont également été déterminées par nivellement de précision, de telle sorte que des anomalies d'altitude peuvent être déterminées, dont la précision peut être estimée à 0,02 m en plaine et 2 ou 3 fois plus en montagne. Il a donc été possible de comparer 66 anomalies d'altitude ponctuelles au géoïde gravimétrique. Des écarts significatifs localement systématiques apparaissent, qu'on peut attribuer à diverses causes [FORSBERG, MASDEN 90], [DUQUENNE et al 94] :

- différence entre le système de référence du réseau géodésique (proche de ETRS89, European Terrestrial Reference System 1989, mais actuellement mal fixé car l'ajustement définitif du réseau n'est pas achevé) et la référence du quasi-géoïde,
- différence entre le quasi-géoïde et la référence du système d'altitude française (IGN69),
- erreurs sur les coefficients du modèle de champ,
- erreurs sur les ondulations résiduelles du géoïde  $N_R$  dues aux défauts de la gravimétrie,
- erreurs dans les coordonnées GPS et les altitudes des points du RBF.

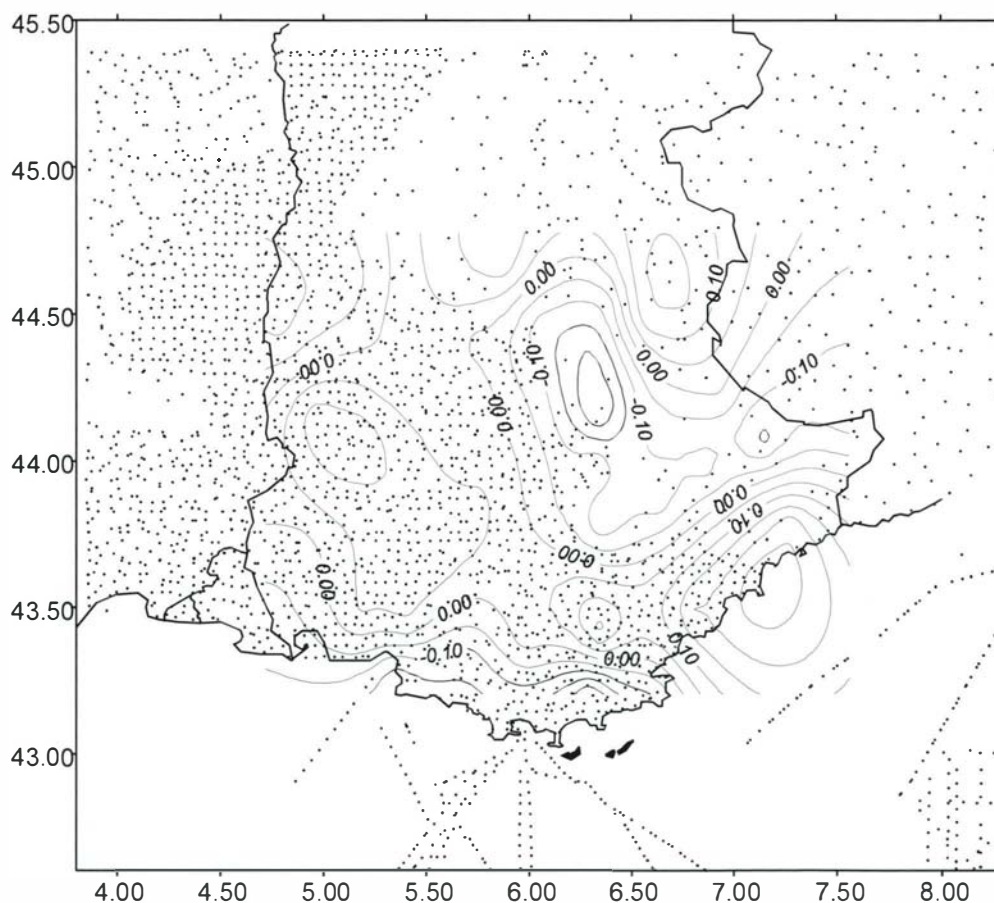
Pour éliminer les effets des erreurs systématiques à grande longueur d'onde et mettre en évidence les deux derniers types d'erreurs, une tendance globale a été retranchée des écarts  $\zeta_{RBF} - \zeta_{Gravi}$ . Cette tendance a été déterminée en utilisant une régression à trois paramètres :

$$\zeta_{RBF} - \zeta_{Gravi} = a + b(\varphi - \varphi_0) + c(\lambda - \lambda_0) + v$$

Dans cette équation,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  sont les paramètres,  $\varphi_0$  et  $\lambda_0$  les coordonnées moyennes de la zone et  $v$  le résidu relatif au point GPS de coordonnées  $\varphi$  et  $\lambda$ . Un premier calcul a permis de confirmer l'existence de deux fautes dans les coordonnées provisoires ou les altitudes des points GPS. Après une correction et le rejet d'un point, on obtient les résultats suivants :

- partie constante du biais :  $a = -1,087$  m
- pente vers le nord :  $b = 47,0$  mm / 100 km,  $0,10''$
- pente vers l'est :  $c = 16,2$  mm / 100 km,  $0,03''$
- écart-type des résidus :  $\sigma = 0,116$  m
- résidu maximum :  $|v_{\max}| = 0,296$  m

Les résidus sont représentés sur la figure B.4.2.5. Ils sont plus grands que les erreurs accidentelles attendues du RBF et du réseau de nivellement (3 à 5 cm sur 100 km), et la plus grande partie des erreurs doit provenir du quasi-géoïde gravimétrique. Sur la figure, où les points gravimétriques ont été reportés, il apparaît que les résidus les plus importants (0,10 à 0,25 m) sont localisés en haute montagne et au bord de la mer, là où les données gravimétriques font défaut. Au contraire, les résidus sont plus faibles (0 à 0,12 m) dans la partie nord-est de la zone d'essais, où la topographie est régulière et la gravimétrie abondante. Il ne fait pas de doute que les résidus pourraient être réduits à moins de 0,05 m dans ces conditions favorables par un ajustement local. Ces remarques permettent de conclure que, en vue d'un géoïde gravimétrique de précision homogène, il serait souhaitable de densifier la couverture gravimétrique dans les Alpes. Des améliorations pourraient être obtenues en introduisant des données supplémentaires disponibles (altimétrie par satellite en Méditerranée), en améliorant la stratégie d'échantillonnage et l'interpolation de la gravimétrie, ou en utilisant des modèles de correction de terrain plus élaborés. Il faut également noter que les mesures GPS et le nivellement sont moins précis et plus sensibles aux erreurs systématiques en zone montagneuse. Cependant, le manque de données gravimétriques reste un problème essentiel.



**figure B.4.2.5** : résidus de la régression à trois paramètres de  $\zeta_{RBF} - \zeta_{Gravi}$  et couverture gravimétrique : la corrélation entre résidus importants et défaut de gravimétrie semble évidente.

## Ajustement combiné de la solution gravimétrique et du réseau de points GPS nivelés

Dans cette partie, on propose une méthode d'ajustement combiné en vue des applications au nivellement par GPS. Cette méthode est implémentée dans le logiciel "PILI" développé par le second auteur de cet article [JIANG 1995], [JIANG, DUQUENNE 95 a et b]. L'objectif est d'obtenir la surface de référence altimétrique (0 des altitudes) effectivement réalisée par le Nivellement Général de la France en adaptant le (quasi-)géoïde gravimétrique à l'ensemble de points GPS nivelés. Le modèle d'ajustement choisi repose sur les principes suivants :

1 - Une partie de l'écart entre le quasi-géoïde gravimétrique et la référence altimétrique présente un caractère systématique et peut être modélisée par des fonctions. Cette partie est elle même séparée en deux :

- une tendance globale  $T$  dépendant d'un ensemble de paramètres  $F$  et des coordonnées géographiques.  $T$  peut inclure des fonctions périodiques des coordonnées modélisant la partie de l'écart due aux erreurs sur les coefficients du modèle de champ, une similitude rendant compte de la coexistence de deux systèmes de référence géodésiques, un polynôme représentant les systématismes de la référence des altitudes :

$$T(\varphi, \lambda) = \sum_{p,q} [x_{p,q} \cos(\omega_p \varphi + \omega_q \lambda) + y_{p,q} \sin(\omega_p \varphi + \omega_q \lambda)] + \Delta X \cos \varphi \cos \lambda + \Delta Y \cos \varphi \sin \lambda + \Delta Z \sin \varphi + k \times r + \sum_{p,q} Q_{p,q} (\varphi - \varphi_0)^p (\lambda - \lambda_0)^q \cos^q \varphi$$

Les paramètres peuvent être trop nombreux et corrélés, il faut savoir les choisir judicieusement.

- une déformation locale  $t$  dépendant de paramètres  $f$  et des coordonnées géographiques.  $t$  représente la partie systématique de l'écart due à des causes locales, telles que les erreurs systématiques locales de la gravimétrie. Le géoïde gravimétrique est divisé en morceaux homogènes du point de vue de la provenance de la gravimétrie, de la topographie, etc. Pour chaque morceau, on introduit un jeu de paramètres  $f$ . Pour des morceaux de taille suffisamment réduite,  $t$  peut être une simple fonction linéaire des coordonnées géographiques :

$$t_m(\varphi, \lambda) = t_{m,0} + a_m(\varphi - \varphi_{m,0}) + b_m(\lambda - \lambda_{m,0})$$

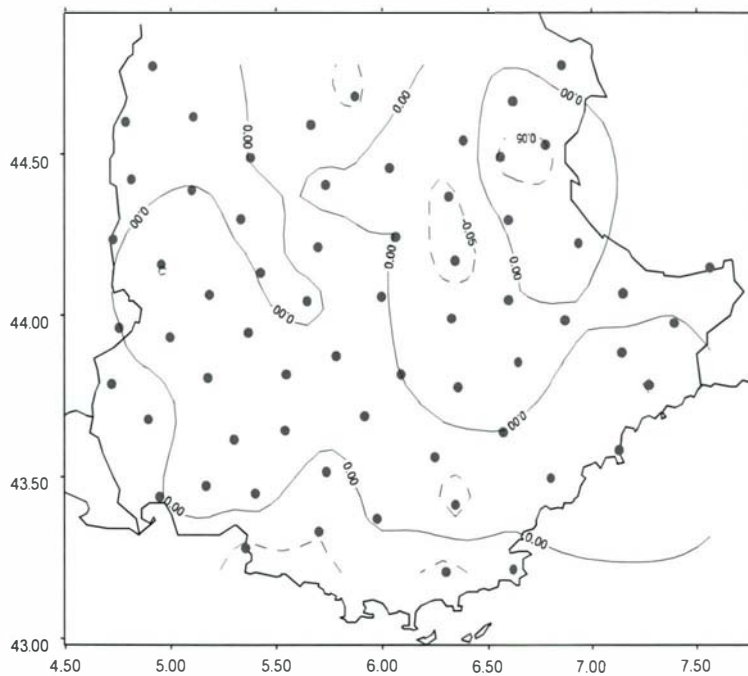
$m$  est un indice de morceau,  $t_{m,0}$ ,  $a_m$ ,  $b_m$  des paramètres à déterminer,  $\varphi_{m,0}$ ,  $\lambda_{m,0}$  les coordonnées du centre du morceau  $m$ . Des équations de contraintes sont introduites pour assurer la continuité entre morceaux de géoïde adjacents.

2 - Les pseudo-observations sont les hauteurs du quasi-géoïde déduites du GPS et du nivellement, et des différences de hauteur de quasi-géoïde gravimétrique entre points voisins. Cette disparité de traitement entre les deux types de données est justifiée par le fait que le réseau de points GPS nivelés possède une bonne exactitude globale, alors que le géoïde gravimétrique est affecté de systématismes qui disparaissent par différence. Les équations d'observation sont pondérées en fonction des précisions estimées du nivellement, du GPS et du géoïde gravimétrique.

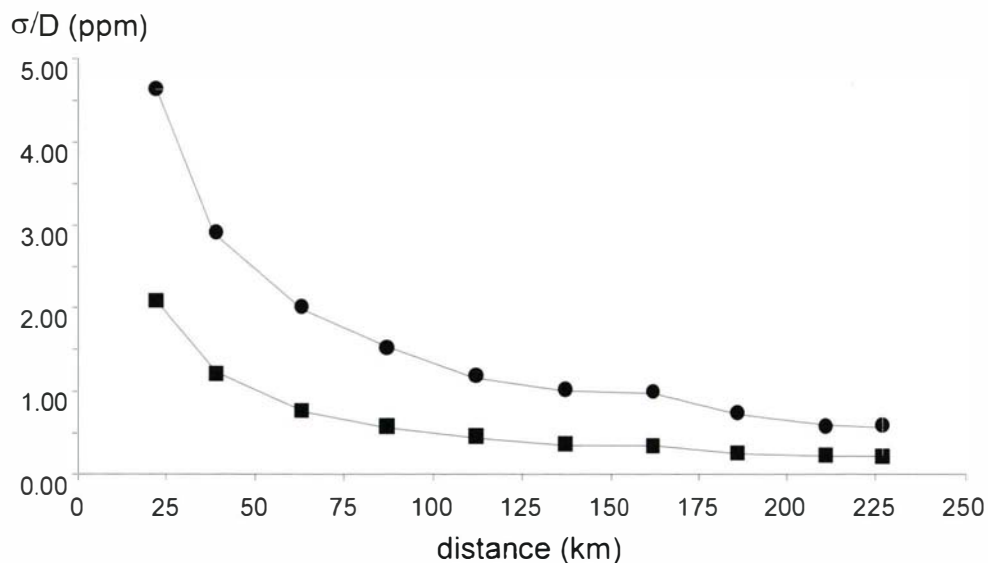
3 - Les inconnues sont les hauteurs de la surface de référence altimétrique et les paramètres de la tendance globale ( $T$ ) et des déformations locales ( $t$ ).

Pour ce qui concerne l'adaptation du géoïde sud-alpin, aucun modèle de déformation local n'a été appliqué. Les résidus sur les points GPS nivelés du RBF sont représentés sur la figure B.4.2.6. Leur écart-type vaut 0,043 m, le résidu maximum atteint 0,106 m. La figure B.4.2.7 met en évidence un gain en précision relative ( $\alpha/D$ ) du géoïde adapté par ajustement combiné, d'un facteur 1,5 environ. Ces résultats, obtenus dans une zone difficile, laissent présager la possibilité de pouvoir réaliser le nivellement par GPS avec une précision permettant de satisfaire les besoins les plus courants.





**figure B.4.2.6 :** résidus de l'ajustement combiné du quasi-géoïde gravimétrique et des anomalies d'altitude dérivées du RBF. Equidistance 0,10 m, intercalaires 0,05 m



**figure B.4.2.7 :** précisions relatives comparées de l'ajustement à trois paramètres (cercles) et de l'ajustement combiné (carrés).

### Conclusions et perspectives

L'étude réalisée montre qu'il est désormais possible de déterminer un géoïde local avec une précision décimétrique même en zone très accidentée. On peut également adapter ce géoïde aux besoins du positionnement altimétrique et atteindre une précision de quatre centimètres. Des progrès peuvent cependant être réalisés dans trois directions :

Le manque de données gravimétriques doit être comblé par la réalisation de nouvelles mesures dans les Alpes et dans d'autres régions montagneuses françaises, et par une meilleure exploitation des données existantes en mer (gravimétrie, altimétrie par satellite). Dans ce domaine plus particulièrement, la collaboration avec le BGI se poursuivra.

Le Laboratoire de Recherche en Géodésie mène actuellement des études sur les processus d'interpolation, en vue d'améliorer la confection des grilles d'anomalies de pesanteur, et dans l'espoir de réduire le volume des données gravimétriques nouvelles nécessaires.

Un géoïde national d'une précision de quelques centimètres n'est plus un objectif hors de portée.

## Remerciements

Nous tenons à remercier tous les organismes et toutes les personnes qui ont fourni gracieusement les données et logiciels utilisés pour ce travail :

- les Professeurs R. Forsberg, C.C. Tscherning et P. Knudsen pour le logiciel GRAVSOFT,
- le Bureau Gravimétrique International pour les données gravimétriques,
- l'Université de l'Ohio (USA) et le Professeur R.H. Rapp pour le modèle global de champ,
- la Société AGIP, le Conseil National de la Recherche, le Service Géologique National Italien et le Professeur F. Sansò pour le MNT italien,
- le Service des Cartes Dérivées et Thématiques et le Service de Géodésie et Nivellement de l'IGN pour le MNT français et les données géodésiques.
- Notre gratitude va également au Professeur G. Balmino, pour ses conseils et ses encouragements amicaux.

## Publications

[DUQUENNE, JIANG 95] H. Duquenne & Z. Jiang : *The geoid in the southern Alps of France*, in : *New geoids in the World*. Publication commune : Bureau Gravimétrique International, bulletin d'information n° 77, International Geoid Service, bulletin n° 4. Préimpression : publication du LAREG MM009, 1995.

[JIANG 1995] Z. Jiang : *PILI, a new software for the geoid determination*, présenté à la XXII Assemblée de l'UGGI, Boulder, USA. Publication du LAREG n° CM022, 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95a] Z. Jiang & H. Duquenne : *Optimal fitting of gravity geoid to GPS levelling points*, annales de l'EGS95, Session G4. Publié dans : *Reports of the Finnish Geodetic Institute*, vol. 95-7, Massala, Finland, 1995. Publication du LAREG n° CM021, 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95b] Z. Jiang & H. Duquenne : *On the combined adjustment of a gravimetrically determined geoid and GPS levelling stations*, accepté par le *Journal of Geodesy*, 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95c] Z. Jiang & H. Duquenne : *Fast integration of the integrals of Stokes; potential and terrain correction in geoid determination*, annales de l'EGS95, Session G4. Publié dans *Reports of the Finnish Geodetic Institute*, vol. 95-7, Massala, Finland, 1995. Publication du LAREG n° CM008, 1995.

[JIANG, DUQUENNE 96] Z. Jiang & H. Duquenne : *On fast integration in geoid determination*, soumis au *Journal of Geodesy*, 1996.

## Références

[BALMA et al 92] G. Balma, G. Balmino, M. Sarrailh & D. Toustou : *Géoiïde gravimétrique français, état d'avancement et programme de travail au GRGS/BGI*, Toulouse, France, 1992.

[DELOMENIE 87] M. Deloménie : *Calcul d'un géoiïde gravimétrique sur la France*, Rapport de stage, IGN & BGI.

[DUQUENNE 92] H. Duquenne : *The new digital terrain model of France*, présenté au First Continental Workshop on the geoid in Europe. Prague, République Tchèque, 1992.

[DUQUENNE et al 94] H. Duquenne, Z. Jiang & C. Lemarié : *Geoid determination and levelling by GPS : some experiment on a test network*, in : *Gravity and Geoid. IAG symposium n° 113*, Graz, Austria, Sept. 1994.

[FORSBERG, MASDEN 90] R. Forsberg & F. Masden : *High-precision geoid heights for GPS levelling*, in : *Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*. Ottawa, Canada, 1990.

[HEISKANEN, MORITZ 67] W.A. Heiskanen & H. Moritz : *Physical Geodesy*, 1967, réimpression: Institute of Physical Geodesy, Technical University, Graz, Austria, 1981.

[LEVALLOIS 71a] J.J. Levallois : *Calcul du géoiïde gravimétrique sur le territoire de la France*, Présenté à la XV<sup>e</sup> Assemblée Générale de l'AIG, Moscou, 1971.

[LEVALLOIS 71a] J.J. Levallois : *Comparaison d'un géoiïde astro-géodésique et gravimétrique sur le territoire français*, Présenté à la XV<sup>e</sup> Assemblée Générale de l'AIG, Moscou, 1971.

[MORITZ 92] H. Moritz : *Geodetic Reference System 1980*, in *Bulletin Géodésique, The Geodesist Handbook 1992*.

[RAPP et al 91] R.H. Rapp, Y.M. Wang & N.K. Pavlis N.K. : *The Ohio State University 1991 Geopotential and Sea Surface Topography Harmonic Coefficient Models*, O.S.U. Report num. 410, 1991.

[SIDERIS, FORSBERG 90] M.G. Sideris & R. Forsberg : *Review of Geoid Prediction Methods in Mountaneous Regions*, in *Determination of the Geoid, Present and Future*, IAG Symp. n° 106, Milan, Italy, 1990.

[SJOBERG 95] L.E. Sjöberg : *On the quasi-geoid to geoid separation*, *Manuscripta Geodetica*, vol. 20, num. 3.

[TOUSTOU 91] D. Toustou : *Chaîne de validation interactive des données gravimétriques : DIVA*, Note technique n° 10, Bureau Gravimétrique International, Toulouse, France, 1991.

[TSCHERNING et al 92] C.C. Tscherning, R. Forsberg & P. Knudsen : *The GRAVSOFT Package for Geoid Determination*, présenté au First Continental Workshop on the geoid in Europe. Prague, Czech Republic, 1992.

[WILLIS et al 94] P. Willis, C. Boucher, S. Botton & H. Fagard : *The RRF Network : A densification of the ITRF for France*, IERS/IGS Workshop, Paris, March 1994, IGN CC/G n 603, 1994.

# **C. Bilan des actions de recherche**

---

## **C.1 IMAGE ET PHOTOGRAMMETRIE**

---

*par Daniel Piquet-Pellorce*

### **Introduction**

*par Daniel Piquet-Pellorce*

Cette année aura vu l'étude préalable du projet de restitution altimétrique assistée par ordinateur (RAAO) menée dans le cadre du Service de l'Information Topographique (SIT) avec l'aide du laboratoire MATIS (voir B.1.3 et C.1.4.4). Ce point est important, car il annonce le passage en production de résultats de la recherche menée en partie au laboratoire MATIS, même s'il faut encore compter une année complète avant un passage effectif. Il souligne à la fois l'intérêt des recherches et en même temps l'importance du temps et de la continuité. Il est à noter aussi qu'il ne marque pas pour autant un point d'orgue, et de nombreux travaux sur le sujet continuent : la corrélation par ensemble (ou facette) (voir C.1.2), tests de lissage cartographique, qualités des MNT, utilisation des lignes caractéristiques pour un meilleur rendu (notamment pour l'estompage).

Il semble que nous approchions de la même maturité pour le suivi de routes interactif pour lequel l'évaluation (C.1.4.2) justifie une étude préalable en 1996. Par ailleurs, au travers de diverses investigations (C.1.4.2) et des thèses sur les systèmes d'interprétation (C.1.3.3, C.1.3.4 et C.1.3.5), une extraction automatique (non exhaustive mais avec un niveau de fiabilité acceptable) se dessine à l'horizon d'environ deux ans.

Sans doute pouvons nous mettre aussi en perspective la recherche sur la lecture automatique des cartes scannées (C.1.1). Suite aux travaux précédents de Marc Pierrot Deseilligny sur la reconnaissance de caractères, maintenant ce sont un peu tous les aspects de la carte qui sont abordés. Si l'année 1995 est essentiellement une année d'algorithmie de base à poursuivre pour une part en 1996, l'interaction entre objets, entre thèmes et entre planches seront à développer pour un système proche de l'opérationnel fin 1997. Dans cette action, une certaine généralité des algorithmes et de la démarche (capacité d'application à d'autres contextes) semble possible et sera également à regarder dans les années qui viennent.

L'action à plus long terme concernant les systèmes d'interprétation d'images aériennes (C.1.4) se développe normalement pour la prise en compte d'informations externes à l'image telles que celles contenues dans la BDCarto (C.1.3.3) ou dans la carte de base scannée (C.1.3.4) et pour l'interprétation locale du contexte (C.1.3.5). L'interprétation de la scène par analyse monoscopique et stéréoscopique conjointe semble assez prometteuse et la première partie de la thèse de Caroline Baillard (B.1.2) permet d'espérer pouvoir lier à terme : détection, compréhension locale du contexte et restitution.

Le champ des images SPOT a été réinvesti dans le cadre de la mise à jour de l'occupation du sol (O.C.S.) de la BDCarto (voir B.1.1). Le premier enseignement de cette étude n'est pas négligeable en permettant de situer le taux d'évolutivité des paysages par rapport au niveau d'incertitude et de généralisation de l'O.C.S. BDCarto et d'en déduire les rythmes réellement nécessaires de mise à jour. Le second enseignement porte sur la faisabilité d'une mise à jour automatique qui semble possible en améliorant le processus développé cette année, ce qui sera fait en 1996.

Enfin, il reste la restitution du bâti. Si les résultats de l'évaluation du processus développé précédemment pour le bâti isolé de grandes dimensions (voir C.1.3.2) sont encourageants en terme de précision géométrique, il demeure que le faible nombre de bâtiments restitués nécessite de se tourner en priorité pour l'instant vers la restitution interactive. Ceci a été abordé (voir C.1.4.3) mais demande un effort plus important à porter au cours des années prochaines.

## C.1.1 Lecture automatique de cartes

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 BDTopo. 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, de par la normalisation des images de documents, se prêtent mieux à une analyse automatique.

Le principe est alors :

- 1 - d'utiliser les informations extraites de la carte pour créer des bases de données d'attente, d'un contenu moins riche que la BDTopo, mais obéissant aux mêmes spécifications de représentation,
- 2 - 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 ont pour conséquence qu'elle doit conduire à une base de données ayant un coût marginal par rapport au coût de la restitution photogrammétrique de la BDTopo. 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, le contexte IGN contribue à rendre cet objectif réalisable car, d'une part, on dispose des planches-mères et, d'autre part, la cartographie 1 : 25 000 de la France est relativement homogène.

Jusqu'à septembre 1994, l'investissement de l'IGN dans la lecture automatique de carte (compte non tenu des travaux sur l'interprétation conjointe carte-image, thèse de Philippe Guérin) a essentiellement consisté à encadrer scientifiquement la thèse de Marc Pierrot Deseilligny effectuée au Ministère de la Défense. Depuis octobre 1994 une équipe de trois personnes est mise en place au laboratoire MATIS pour travailler sur la lecture de cartes.

Une partie importante du travail de 1995 a été un travail «d'initialisation» : portage des logiciels développés par Marc Pierrot Deseilligny au Ministère de la Défense, «formation» et bibliographie en reconnaissance de forme et analyse d'images pour Fabrice Lecourt et Robert Mariani. Globalement, on peut considérer que la moitié de la force de travail a été consacrée à cette initialisation. Par ailleurs le travail principal de l'année a consisté en :

- la vectorisation et la reconstruction de réseaux (hydrographique et routier sur la planche de rouge),
- un inventaire du fonds cartographique existant,
- la mise au propre de certains «logiciels» développés par Marc Pierrot Deseilligny.

### Lecture de la planche de bleu

La lecture de la planche de bleu commence par l'extraction des chaînes de caractères, des disques connectés au réseau, des objets surfaciques texturés et des marécages. Le réseau restant, composé de lignes tiretées et de lignes pleines interrompues, a été vectorisé et reconstruit de façon hiérarchique : transformation des lignes tiretées en traits pleins, puis reconnexion des traits pleins entre eux. Cette reconstruction se fait en préservant la planarité du graphe. Actuellement, pour valider l'ajout d'une connexion dans le réseau, l'algorithme vérifie si celle-ci intersecte le réseau routier de la planche de rouge, ou un disque préalablement extrait.

La valuation des arêtes du graphe avec l'attribut «trait plein» ou «trait tireté» se fait à l'aide d'une méthode de programmation dynamique locale qui vise à attribuer un brin du graphe, et d'une analyse hiérarchique globale du réseau qui tente de corriger les erreurs de la méthode locale. Un coefficient de confiance est fourni pour chaque attribut.

La valuation des brins du graphe avec l'attribut «bordé d'arbres» commence par une projection des disques sur le réseau. A l'aide du graphe du réseau hydrographique, on construit le graphe des disques projetés, où un disque représente un sommet du graphe, et une arête représente le plus court chemin dans le graphe du réseau hydrographique entre ces deux disques. Ces arêtes sont ajoutées si certains critères sont vérifiés (courbure entre deux disques faible etc...). Enfin, le programme essaie de prolonger au mieux les chaînes de disques sur des sommets particuliers du graphe du réseau hydrographique (extrémités, points anguleux).



Pour la reconstruction des objets surfaciques fragmentés deux méthodes ont été proposées. La première opère en mode bitmap, sans connaissances a priori, et consiste à synthétiser la connexion. Le problème est qu'elle peut générer plus de connexions qu'il n'en faut, et la détection d'une connexion incohérente ne peut se faire qu'avec une approche en mode vecteur. La deuxième travaille directement avec les contours en mode vecteur des objets. Ces contours sont orientés, par exemple, avec la convention «matière à droite». L'idée est de calculer tous les couples de connexions valides, de les pondérer, et de les ajouter itérativement jusqu'à avoir une situation stable.

Parallèlement, une bibliographie sur les liens intra-planches et inter-planches est en cours de réalisation.

## **Lecture de la planche de rouge**

La planche des rouges contient divers objets dont les plus importants, en terme d'apparition dans l'image, sont les courbes orographiques et les textures des routes principales et secondaires. Pour la carte de Noves (Bouches-du-Rhône) sur laquelle les essais ont été effectués, il existe deux sous-planches, l'une contenant les textures des routes principales et secondaires et l'autre les courbes orographiques. Le travail a porté sur la sous-planche des textures des routes, les courbes orographiques pouvant être obtenues par d'autres méthodes que l'interprétation de carte.

Le réseau des routes principales et secondaires est un réseau peu dense et sa reconstruction a donné de bons résultats. Les deux textures rencontrées sont l'aplat et le tramé. Elles apparaissent liées à des tirets et à des traits pleins. La méthode procède en quatre étapes :

- 1 - séparation des objets en aplat des objets tramés par morphologie mathématique,
- 2 - transformation du tramé en aplat,
- 3 - squelettisation et vectorisation. A l'issue de cette étape, on obtient un graphe dont les éléments sont à reconnecter. Ceci est fait dans une dernière étape :
- 4 - reconnexion des éléments du graphe entre eux. Cette étape utilise des règles de connexion propre au réseau routier. Toutefois, les algorithmes utilisés sont les mêmes que ceux utilisés par Robert Mariani pour la reconstruction du réseau hydrographique (réseau beaucoup plus dense et complexe que le réseau des routes sur la planche des rouges). Un effort de mise en commun des méthodes de reconnexion a donc été réalisé pour ces deux réseaux. Ceci a abouti à un module général de reconstruction de réseau donnant de bons résultats pour les deux réseaux. Pour la planche des rouges, planche relativement simple, on peut considérer que le travail est terminé.

## **Décomposition en segments de droite**

Une étude sur la décomposition d'un graphe en segments de droites a commencé. Elle vise à l'implémentation d'un algorithme de vectorisation spécialement adapté aux thèmes composés de segments de droites «parfaits» comme les lignes électriques, certains symboles, le linéaire non identifié et les surfaces hachurées. Elle est justifiée par le fait que lors de la squelettisation d'une image, le squelette est très souvent perturbé au niveau des intersections d'objets. Ceci empêche d'avoir, pour un objet rectiligne des arcs de même orientation. La méthode utilisée procède de la manière suivante :

- 1 - squelettisation de l'image initiale et effacement des intersections sur une distance dépendante de la largeur des traits à l'endroit de l'intersection,
- 2 - vectorisation du squelette,
- 3 - reconnexion des arcs obtenus en considérant des critères géométriques et radiométriques, ceci signifiant qu'un arc créé à partir de deux autres arcs presque alignés est recalé par rapport à l'image initiale. Des tests concernant d'une part les lignes électriques et le linéaire non identifié pour la planche des noirs et d'autre part les surfaces hachurées sur la planche des verts, ont été effectués et les résultats obtenus sont prometteurs.

## **«Inventaire» du fond cartographique IGN**

Un inventaire «bibliographique» de la carte IGN au 1 : 25 000 est en cours de conception. Il s'intéresse d'une part, aux différents types cartographiques utilisés pour la fabrication de la carte au 1 : 25 000 au cours des quarante dernières années et à leurs implications dans la conception ou la révision d'une carte, et d'autre part, à leurs méthodes de fabrication. Le premier point est justifié par le fait que si l'on veut détecter un objet, il faut connaître sous quelles formes il peut apparaître, l'écriture des algorithmes en dépendant. Le deuxième point se justifie quant à lui par le fait que l'IGN étant un producteur de cartes, il peut être intéressant d'utiliser les sous-planches réalisées lors de la fabrication de la carte. Ceci a été par exemple fait pour la planche des rouges. Les premières statistiques réalisées montrent que pratiquement, à part pour la planche des rouges, aucune des sous-planches n'est suffisamment fabriquée pour une carte donnée. Il semble donc que la réponse quant à l'utilisation éventuelle de sous-planches pour l'interprétation des cartes soit négative.

## Travaux divers

Le travail effectué sur les écritures a été «industrialisé». Il ne s'agissait pas d'écrire réellement un logiciel final mais de passer à un prototype maintenable et modulaire. Les points suivants ont été notamment abordés :

- prise en compte de certaines erreurs résiduelles dans la recherche des caractères connectés par l'ajout de nouveaux critères de reconnaissances de formes,
- possibilité de reprise «à chaud» à partir d'une étape donnée. En effet, plus on avance dans l'application, plus il est nécessaire de pouvoir mettre au point les étapes aval sans avoir à refaire tourner les programmes amont,
- prise en compte des symboles non connectés (églises, court de tennis, bornes etc...); les méthodes de reconnaissance de forme mises au point sur les caractères se généralisent sans trop de problèmes aux symboles. Il faut cependant tenir compte du fait que la forme de ces derniers est sujette à de plus grande variation,
- paramétrisation correcte de la planche avec codification «objet» des spécificités de chaque facture. Ceci est nécessaire pour pouvoir prendre en compte et maintenir les nombreuses «petites» variantes qui existent sur chaque type de planche,
- enfin, on a commencé à prendre en compte des connaissances de «haut niveau» sur le vocabulaire des chaînes. D'une part on a constitué un dictionnaire des mots fréquents sur la carte, pour l'instant limité à deux cent cinquante mots ou abréviation; celui-ci permet de ne pas alerter les mots reconnus même quand la forme des caractères est douteuse. D'autre part, après apprentissage sur un dictionnaire électronique, on a mis au point un algorithme permettant de décider si un nom propre est prononçable.

On a étudié le problème de mise en correspondance des planches et de leur géo-référencement. La détection automatique des coins de calage fonctionne sur les quelques tests effectués; cependant il n'est pas sûr qu'il soit souhaitable de prolonger cette recherche (saisie manuelle rapide et coût des erreurs très important). La détection des croix kilométriques a été effectuée, elle permettra un recalage fin entre image et photo (dans le cas où la transformation entre coordonnées pixels et coordonnées Lambert ne peut pas être modélisée par une similitude).

## Publications

[GUÉRIN et al 95] P. Guérin, M. Pierrot Deseilligny & H. Maître : *Global Analysis of a Scanned Map for an Automatic High Level Interpretation*, Image Processing and its Applications (IPA'95), Edimbourg (UK), 3-5 juillet 1995, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950016/C-COM, 1995.

[MARIANI et al 95] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, Y. Lecourtier, J. Labiche & R. Mullot : *Algorithms for Hydrographic Network Reconstruction*, ICSC'95, Hong-Kong, décembre 1995, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950009/C-COM, 1995.

[PIERROT DESEILLIGNY et al 95a] M. Pierrot Deseilligny, H. Le Men & G. Stamon : *Characters Strings Recognition on Maps : a Rotation Invariant Recognition Method*, in «Pattern Recognition Letters», SR 950014/C-ART, 1995.

[PIERROT DESEILLIGNY et al 95b] M. Pierrot Deseilligny, H. Le Men & G. Stamon : *Characters Strings Recognition on Maps : a High Level Reconstruction Method*, 3th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR'95), Montréal (CDN), 12-14 août 1995, pp 249-252, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950017/C-COM, 1995.

[PIERROT DESEILLIGNY et al 95c] M. Pierrot Deseilligny, H. Le Men & G. Stamon : *Lecture Automatique des Ecritures sur Cartes Scannées*, article accepté pour un numéro spécial de «Traitement du Signal» reprenant certains articles du CNED'94 (Congrès National sur l'Écrit et le document), SR 950026/C-ART, 1995.

[MARIANI et al 96] R. Mariani, F. Lecourt, M. Pierrot Deseilligny, Y. Lecourtier & J. Labiche : *Lecture Automatique de Cartes Géographiques, Algorithmes de Reconstruction des Réseaux Hydrographiques et Routiers*, article soumis au 10ème congrès «Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle», RFIA'96, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960005/C-COM, 1996.

## C.1.2 Conception et mise en œuvre d'algorithmes pour la vision stéréoscopique

par Patrick Julien

### C.1.2.1 Extraction du relief - Corrélation par facettes

#### Contexte - Objectifs

La corrélation par facettes repose sur le principe suivant : les deux ortho-images d'une facette de terrain sont identiques si la facette approxime parfaitement le terrain. En conséquence, pour trouver la facette qui décrit le mieux une portion de terrain, il suffit d'évaluer les corrélations entre ortho-images pour la population des facettes possibles; celle donnant la meilleure corrélation est la facette cherchée.

Cette technique présente le double intérêt de donner des corrélations élevées (le relief étant corrigé, du moins au premier ordre), donc significatives, et de restituer une surface généralisée. En particulier les courbes de niveau dérivées ont une apparence proche de celle des courbes de la carte à 1 : 25 000.

Elle est donc prometteuse notamment pour la restitution des courbes de niveau de la base de données topographiques.

#### Activité - Résultats

Le début d'année a été consacré à réécrire les fonctions d'affichage et de communication en utilisant Xwindow. On espère avoir maintenant un outil de base valable pour une longue durée.

Sur un plan plus théorique, on a apporté à la version antérieure plusieurs perfectionnements.

Les facettes sont maintenant indépendantes, ceci afin de pouvoir restituer des discontinuités du terrain. Chaque facette est donc décrite par quatre paramètres, les altitudes de ses sommets; ou encore en chaque nœud, il y a quatre altitudes, celles des sommets des facettes touchant ce nœud; le raccord n'est imposé que si les altitudes sont voisines. L'indépendance des facettes permet aussi de déceler celles correspondant à des parties cachées.

L'avancement du travail se fait par propagation à partir d'une facette-amorce considérée comme très sûre. Ceci permet d'économiser le temps appréciable de recherche d'une position approchée. Les précautions sont prises pour éliminer le risque de dérive, propre à une méthode de propagation. La fiabilité est donc la même qu'auparavant.

La contrainte de pente maximale des facettes est maintenant prise en compte. Ce perfectionnement semble aller de soi, mais on avait cru pouvoir s'en dispenser; l'expérience a montré sa nécessité.

Enfin le corrélateur «connaît» maintenant les bordures noires des photographies, ce qui lui permet de s'abstenir de (mal) traiter les bords d'images. On a introduit à cette fin une fonction de saisie sur écran (mais un détecteur automatique a aussi été développé dans le cadre d'une autre recherche).

#### Prolongements envisagés

La poursuite de cette recherche comporte deux axes. L'un est la restitution de facettes de tailles variables, susceptibles de mieux approximer le terrain. L'autre est la restitution des bâtiments isolés, modélisés par des parallélépipèdes rectangles.

Ainsi la corrélation par facettes va se prolonger en une méthode plus générale qu'on peut appeler «corrélation contrainte par modèle 3-D».

## C.1.3 Systèmes d'interprétation d'images aériennes

par Olivier Dissard

### C.1.3.1 Introduction

Les algorithmes de détection monothématiques (routes, bâtiments, relief...) développés au laboratoire MATIS donnent des résultats dont la qualité et l'exhaustivité dépendent beaucoup du contexte topographique de l'objet recherché et des conditions de prise de vue. Pour améliorer la précision, la cohérence et l'exhaustivité des algorithmes, une idée est d'injecter dans le processus de l'information supplémentaire ou de faire coopérer les différents algorithmes d'extraction. Ces opérations appartiennent aux domaines abordés par les systèmes d'interprétation d'images.

L'action «Systèmes d'Interprétation» a débuté en 1995; elle a pour but d'acquérir au niveau du laboratoire MATIS de l'expérience dans les domaines abordés par les systèmes d'interprétation d'images aériennes, au travers d'un certain nombre de recherches qui en abordent un ou deux aspects particuliers. Elle doit nous permettre de répondre à des questions précises : quelle information supplémentaire apporte une combinaison de nos traitements ? Comment aborder le contrôle automatique des résultats intermédiaires et finaux d'un enchaînement d'algorithmes de traitement d'image ? Qu'est-ce qu'une stratégie optimale de combinaisons de traitements ? Quelle est l'influence du modèle sur les résultats a posteriori ?

En ce sens elle regroupe des sujets qui ont déjà débuté au laboratoire MATIS en 1994 :

- apport des bases de données vecteur pour l'interprétation d'images (thèse de Ghislaine Bordes) : de l'information supplémentaire provient de la BDCarto, l'accent est mis sur la construction de la base de connaissances a priori, la modélisation des principaux acteurs du processus pour une stratégie d'interprétation définie au début de la recherche; le but est la restitution des routes,

- apport des cartes scannées pour l'analyse de scène en imagerie aérienne : application à la détection du réseau routier (thèse de Philippe Guérin). On reste ici dans le cadre de la restitution du réseau routier, l'interprétation de la carte scannée fournit un inventaire des objets à retrouver, l'accent est mis sur le contrôle du résultat opéré par le processus et sur l'enrichissement de celui-ci avec l'information provenant de l'interprétation de la carte, au fur et à mesure de l'extraction dans l'image,

- contrôle d'un processus d'extraction du réseau routier par interprétation locale du contexte, appliqué à la production de données (thèse de Renaud Ruskoné) : le réseau routier est extrait par coopération de traitements bas et haut niveau. L'apport d'information de haut niveau est restreint à la résolution des problèmes locaux par des spécialistes. L'accent est mis sur le développement de ces spécialistes et sur la stratégie qui contrôle leur utilisation (mécanismes de décision).

De plus l'année 1995 a vu se commencer un axe de recherche intitulé «collaboration d'algorithmes monoscopiques et stéréoscopiques pour la restitution du relief» : une coopération entre, d'une part des algorithmes de corrélation et d'autre part des algorithmes monoscopiques d'interprétation d'image qui permettra d'exploiter leurs complémentarités en progressant en parallèle dans la restitution du relief et l'interprétation de la scène. Dans le cadre de cette étude, notons le commencement en octobre 1994 d'une thèse intitulée «conception d'un système d'analyse d'images aériennes appliqué à la restitution du relief» (Caroline Baillard). L'accent est mis sur la modélisation de la scène et sur la mise au point d'une stratégie de restitution du relief basée sur cette modélisation.

Par ailleurs, nous avons évalué le travail effectué dans le cadre de l'action de recherche sur la restitution automatique des bâtiments qui représente un premier travail basé sur la complémentarité d'algorithmes sans toutefois traiter leur coopération.

Nous présenterons dans un premier temps cette évaluation avant de nous intéresser aux axes que nous venons de décrire.

### **C.1.3.2 Evaluation de la méthode d'extraction automatique de bâtiments développée dans le cadre de l'action de recherche : Restitution des bâtiments sur couples de photographies aériennes.**

La méthode d'extraction automatique de bâtiment a été développée de 1991 à 1994 dans le cadre de la thèse ENST de Tuan Dang (direction Henri Maître). Elle est décrite dans le bulletin d'information de l'IGN, recherche 1994. Nous rappelons juste qu'elle est basée sur une complémentarité entre algorithmes monoscopiques et stéréoscopiques au niveau de la précision : en effet, une analyse monoscopique basée sur la théorie des groupements perceptuels nous fournit des structures géométriques avec une bonne précision de placement en X et Y; tandis que l'analyse stéréoscopique d'après corrélation nous fournit une évaluation correcte du Z. Le lien entre ces deux analyses se fait grâce à une modélisation plane des disparités par moindre carré ou par plan médian, à l'intérieur des régions détectées par groupement perceptuel.

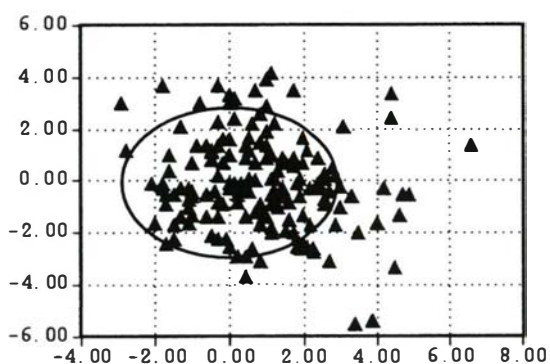
Nous avons voulu tester ici non pas l'exhaustivité de la méthode, le nombre d'erreurs, de fausses détections, mais sa précision lorsque la détection est effective. Nous avons donc sélectionné une quarantaine de bâtiments de forme simple (rectangulaire) et à toit plat, représentant 172 coins pour lesquels nous possédons les résultats de la BDTopo sur des images au 1 : 20 000 scannées à vingt microns. Pour ces images, un pixel au sol représente 40 x 40 cm<sup>2</sup> tandis qu'un pixel de parallaxe représente un deltaZ de un mètre.

Sur ces 41 bâtiments, nous en avons détecté 37 représentant 148 coins exacts sur lesquels ont porté nos évaluations en X et Y. L'évaluation en Z a porté sur la correction par des modèles plans de disparités obtenues par une corrélation pixelaire, d'une part à partir des formes X,Y de la BDTopo, d'autre part sur les formes détectées. Nous avons enfin mis en correspondance des structures homologues détectées sur chacune des deux images et déduit leur élévation. Toutes les évaluations figurent dans le tableau et graphe suivants :



	population	biais	écart type	E.M.Q.
a) Précision planimétrique algébrique X	148	0,30 m	0,68 m	0,75 m
algébrique Y	148	-0,10 m	0,70 m	0,71 m
distance	148	0,89 m	0,51 m	1,02 m
b) Précision altimétrique algébrique	148	-0,07 m	0,60 m	0,60 m
absolue	148	0,46 m	0,39 m	0,60 m
avec mise en correspondance des structures rectangulaires algébriques	67	-1,07 m	2,78 m	2,98 m
tests d'après la planimétrie de la BDTopo algébrique	172	0,12 m	0,52 m	0,54 m
absolue	172	0,43 m	0,33 m	0,54 m

*tableau C.1.3.1 : précisions obtenues*



*figure C.1.3.1 : précision planimétrique : les coordonnées sont exprimées en pixels; 1 pixel représente 0,4 mètre. l'ellipse représente une distance de 1,2 mètres.*

Les conclusions que nous pouvons tirer sont que la précision inhérente à un processus de groupement perceptuel est celle que nous souhaitons, dès que la structure détectée correspond au bâtiment (mais nous avons sur ce point de gros progrès à faire en exhaustivité et dans la reconnaissance de structures plus compliquées); de même, la précision altimétrique convient dans le cas de toits horizontaux. Cela dit, la mise en correspondance de structures homologues n'est pas à rejeter dans le cas des toits obliques (non traités ici), car les résultats de corrélation y sont décevants si l'on reste dans les échelles actuelles.

## Références

[DISSARD, JAMET 95] O. Dissard & O. Jamet : *3-D Reconstruction of buildings from stereo images using both monocular analysis and stereo matching : an assessment within the context of cartographic production*, «Integrating Photogrammetric techniques with Scene Analysis and Machine Vision II», Orlando (USA), avril 1995, in SPIE volume 2486, pp. 255-266, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950011/C-COM, 1995.

### C.1.3.3 Apport des bases de données vecteur pour l'interprétation d'images

par Ghislaine Bordes

Cette thèse a débuté en octobre 1993, dans la continuité des recherches sur l'extraction du réseau routier. L'objectif général de cette recherche est d'évaluer l'apport de données externes pour l'interprétation d'images aériennes et en particulier pour l'extraction des routes. Les données utilisées sont celles de la BDCarto.

Au cours de la première année de thèse, nous nous sommes orientés vers la constitution d'un système à base de connaissances qui présente l'avantage de distinguer nettement les connaissances et les traitements. La connaissance fournie par la BDCarto® peut être facilement intégrée dans la base de connaissances, en tant que connaissance externe sur la scène. En ce qui concerne les traitements d'extraction de routes, nous proposons d'avoir une palette d'opérateurs utilisant des critères différents. Tout l'enjeu de notre système est d'être capable de sélectionner l'opérateur le plus efficace, en tenant compte des informations fournies par la base de connaissances. Nous avons d'autre part défini une stratégie d'interprétation qui consiste à rechercher en priorité les tronçons fiables et facilement repérables dans l'image, cette recherche des tronçons «les plus faciles» devant faciliter celle des tronçons moins évidents.

Cette année, nous nous sommes donc intéressés plus particulièrement à l'acquisition de la connaissance nécessaire pour la mise en oeuvre de notre stratégie d'interprétation. Les différents tests réalisés ont été faits sur trois zones pour lesquelles nous disposons de la BDCarto®, de la BDTopo® et d'ortho-images numériques de résolution cinquante centimètres.

Nous avons réalisé une étude statistique [BORDES 95a] évaluant la qualité de la localisation des tronçons par appariement des points du réseau routier de la BDCarto® et de celui de la BDTopo®. De cette étude a été déduit un modèle de prédiction de la fiabilité des tronçons. La fiabilité «a priori» est calculée à partir des attributs du tronçon et de son contexte, puis elle est stockée sous forme d'attribut des tronçons. Afin de préciser l'information fournie par la fiabilité a priori, nous avons déterminé des «indicateurs pictoriels» qui permettent de confirmer la présence de la route à l'emplacement indiqué par la BDCarto® et de préciser l'aspect de la route dans l'image (radiométrie, largeur...). Trois indicateurs fondés sur des critères simples de détection des routes ont été définis puis testés et validés.

Les deux étapes de tests réalisées cette année permettent d'ordonner les segments de la BDCarto® et de commencer l'interprétation par les plus évidents. L'étape suivante consiste à étudier les performances des quatre opérateurs d'extraction que nous nous proposons d'utiliser en fonction des attributs des tronçons et des indicateurs pictoriels. Il est clair que notre objectif n'est pas de développer de nouveaux opérateurs d'extraction de routes mais d'utiliser au mieux ceux qui existent déjà. Il s'agit d'une part de savoir paramétrer au mieux les algorithmes d'extraction de route en fonction des caractéristiques du segment de route étudié et de son contexte et d'autre part de savoir choisir l'algorithme qui sera le plus efficace dans tel ou tel cas.

#### Références

[BORDES 95a] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *GIS-Guided Interpretation of Aerial Imagery : Application to Automatic Road Extraction*, Great Lakes Conference on Digital Photogrammetry and Remote Sensing'95, juin 1995, St Petersburg (CEI), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950002/C-COM, 1995.

[BORDES 95b] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Road Extraction Guided by a Cartographic Database : Creating a Strategy*, ICCV 95, Workshop on Context Based Vision, Cambridge (MA), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950004/C-COM, juin 1995.

[BORDES 95c] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Utilisation d'un système d'information géographique pour l'interprétation automatique d'images aériennes*, 17ème Conférence Cartographique Internationale, Barcelone (E), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950007/C-COM, septembre 1995.

### C.1.3.4 Apport des cartes scannées pour l'analyse de scène en imagerie aérienne : application à la détection du réseau routier

par Philippe Guérin

Cette recherche a débuté au laboratoire MATIS en 1993 dans le cadre d'une thèse financée par l'IGN (direction Henri Maître). Elle vise à développer les techniques d'interprétation de photos aériennes en guidant l'analyse par des données externes symboliques issues d'une carte topographique. L'application concrète concerne l'extraction du réseau routier.

Dans un premier temps, une étude statistique a été réalisée pour évaluer la qualité des informations contenues dans la carte, en modélisant les déformations carte-image existantes au niveau du réseau routier. En effet, même en considérant l'information contenue dans la carte comme étant disponible dans sa totalité (c'est-à-dire en ne tenant pas compte des pertes inhérentes à la phase de vectorisation de la carte scannée), une simple superposition des données sur l'image montre des décalages qu'il faut prendre en compte pour une extraction correcte et exhaustive des primitives de route.

Pour cela, une saisie de référence du réseau routier a été effectuée sur la carte; de même, sur l'image, on a utilisé l'extrait de la BDTopo correspondant; une sélection de points d'amer identifiables sur les deux documents a permis d'effectuer un contrôle ponctuel avec calcul de statistiques; un contrôle linéaire par identification aux plus proches voisins des sommets des arcs a servi ensuite pour étudier les déformations tronçon par tronçon, et à en déduire un modèle de passage d'un réseau à un autre. La méthode a dégagé l'essentiel du modèle de déformation :

- au niveau quantitatif : valeurs maximales des décalages, statistiques générales sur l'ensemble test,
- au niveau qualitatif : caractérisation de l'influence de la nature des points contrôlés,
  - caractérisation des points significatifs de la structure du réseau,
  - rôle et importance du contexte sur les déformations,
  - détection et étude des incohérences topologiques ....

Cela a permis un acheminement vers un modèle de prédiction de l'allure du réseau, en hiérarchisant la qualité des objets géographiques et en estimant l'amplitude des déformations.

La zone test s'est étendue sur 3,3 km x 5,5 km et comprend 55 kilomètres de réseau routier. Les résultats de l'étude sont présentés dans [GUÉRIN 95a].

Dans un deuxième temps, nous avons repris l'acquis du laboratoire en matière d'outils de détection automatique de route (détecteur d'amorces, modules de suivi de route, module de recalage de BDCarto). Ces outils ont été testés dans un environnement interactif pour juger leurs capacités et leurs points faibles, et surtout définir leur utilité dans un processus guidé par la connaissance de la carte.

Enfin, nous avons abordé le choix d'une stratégie d'utilisation des deux documents carte et image. Une réflexion a ainsi été menée sur l'apport de la carte topographique dans la détection des routes et sur les différents schémas envisageables d'exploitation de la carte. Elle a été rassemblée dans [GUÉRIN 95b]. A partir de ce document, nous avons défini une méthodologie de recalage du réseau carte sur l'image, qui fait l'objet actuellement d'une intégration.

## Références

[GUÉRIN 95a] Ph. Guérin : *Caractérisation et estimation des déformations existant sur une carte topographique : d'un modèle de déformation à un modèle de prédiction*, rapport interne, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950001/C-RAP, mars 1995.

[GUÉRIN 95b] Ph. Guérin : *Apport des cartes scannées dans la détection du réseau routier en imagerie aérienne*, rapport interne, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950027/C-RAP, mai 1995.

[GUÉRIN, DESEILLIGNY 95] Ph. Guérin & M. Pierrot Deseilligny : *Global analysis of scanned maps for an automatic interpretation*, in proceedings ICIP'95, Edinburgh (UK), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950016/C-COM, juillet 1995.

[GUÉRIN, MAITRE 95] Ph. Guérin & H. Maître : *Distortion model in road networks from maps : identification and assessment*, in proceedings SPIE Aerosense'95, Orlando (USA), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950012/C-COM, avril 1995.

### C.1.3.5 Contrôle d'un processus d'extraction du réseau routier par interprétation locale du contexte, appliqué à la production de données

par Renaud Ruskoné

L'expérience acquise au cours des années précédentes a permis d'établir qu'une grande partie du réseau routier peut être extraite sur des critères d'assez bas-niveau, mais que les cas échappant à une modélisation simple de la route nécessitent une expertise plus poussée. Ces remarques ont conduit au développement d'une architecture intégrant les outils de détection des routes pré-existants et faisant appel à des spécialistes dédiés à la reconnaissance d'objets particuliers.

## Les grandes lignes

Après une phase d'extraction exhaustive du réseau routier, une étape de vérification s'avère donc nécessaire. Elle passe d'abord par la valuation du réseau extrait (principalement grâce à des critères radiométriques et géométriques) puis par sa pré-identification (classification aux k plus proches voisins des segments constitutifs du réseau) avant que des spécialistes ne valident les hypothèses précédemment émises. La pré-identification est une étape cruciale dans la mesure où elle conditionne l'utilisation de tel ou tel spécialiste [RUSKONÉ 95].

## Utilisation de spécialistes

Ces spécialistes cherchent à identifier des objets provoquant une modification importante des caractéristiques de la route (ombres, arbres...) ou possédant des caractéristiques communes (radiométrie élevée de certains champs, par exemple). Deux spécialistes ont été étudiés cette année :

- le premier concerne l'identification des carrefours par détection de l'objet central (places circulaires ou terre-pleins), essentiellement par des méthodes de «pattern matching» [CAUDRELIER 95]. Ce module entre dans le cadre d'un spécialiste de détection des carrefours,

- le second permet l'identification des véhicules par utilisation d'un réseau de neurones. Le regroupement en files permet de confirmer les détections [GUIGUES 95]. L'intérêt d'un tel spécialiste est multiple : extraction en milieu urbain, confirmation des hypothèses de route, voire résolution d'obstacles complexes (quand plusieurs objets modifient localement les caractéristiques de la route).

L'année 1996 sera principalement consacrée au développement des étapes de validation d'hypothèses, c'est-à-dire à l'intégration de spécialistes au sein du système, et à la propagation de leur expertise au sein du graphe routier (remise en question ou confirmation de portions du réseau).

## Références

[CAUDRELIER 95] D. Caudrelier : *Modélisation et étude des carrefours sur photographies aériennes*, rapport de stage du DEA Sciences de la Terre, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950028/C-STA, septembre 1995.

[GUIGUES 95] L. Guigues : *Détection des véhicules sur images aériennes*, rapport de stage du DEA - IARFA, Paris-6, laboratoire MATIS, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950029/C-STA, septembre 1995.

[RUSKONÉ 95] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road network extraction by local context interpretation*, in Europto proceedings, Paris (F), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950030/C-COM, 1995.

### C.1.3.6 Collaboration d'algorithmes monoscopiques et stéréoscopiques pour la restitution du relief

par Caroline Baillard et Olivier Dissard

Cette recherche part de la constatation qu'il n'existe pas d'algorithme de corrélation qui puisse restituer un relief convenable sur des régions possédant des objets 3-D différents. Certains algorithmes stéréoscopiques quand ils ne sont pas spécifiques de la restitution d'une classe d'objets en particulier, possèdent des qualités et des défauts suivant l'objet 3-D abordé. L'idée est de faire collaborer ces algorithmes pour restituer un relief avec le moins d'erreur et la meilleure précision possible, en analysant en parallèle la nature du sol. Cette analyse peut se fonder sur de l'algorithmie monoscopique (études texturales, analyses de forme...) mais aussi sur l'algorithmie stéréoscopique (analyse du sursol, étude texturale des disparités...). Ainsi, nous progressons en parallèle dans la compréhension de la scène et l'affinement du relief.

Le travail effectué dans le cadre de cette recherche consiste en une thèse débutée en octobre 1994 intitulée «Conception d'un système d'analyse d'images aériennes appliqué à la restitution du relief» : les objets à prendre en considération pour une telle analyse y sont modélisés, une stratégie de coopération sera mise au point. Par ailleurs, des algorithmes monoscopiques et stéréoscopiques orientés vers l'extraction ou la caractérisation des objets modélisés, seront développés en complément des algorithmes déjà étudiés au laboratoire MATIS.

### Conception d'un système d'analyse d'images aériennes appliqué à la restitution du relief

On désire mettre au point un système d'analyse d'images qui exploite à la fois des éléments d'analyse 2-D et 3-D, afin d'évaluer l'apport de ce type de coopération au niveau de la qualité de restitution. On espère ainsi, à partir d'une mise en correspondance initiale des images, pouvoir utiliser la connaissance locale de l'altitude et des comportements stéréo pour aider la reconnaissance monoscopique de certains objets de la scène (bâti, végétation); réciproquement, l'interprétation partielle de la scène qui sera peu à peu établie permettra d'affiner le modèle d'altitude.



Une recherche bibliographique nous a permis dans un premier temps de faire le point sur divers travaux en liaison avec notre étude : techniques d'appariement stéréo, travaux basés sur une collaboration mono/stéréo (consacrés le plus souvent à l'extraction des bâtiments), systèmes à base de connaissances. Nous avons alors mis en place un algorithme de mise en correspondance adapté à nos contraintes [BAILLARD 96], puis étudié différentes façons d'exploiter ses résultats sous la forme de post-traitements sur les disparités. Ce travail, ainsi que la mise en évidence du comportement spécifique de certains objets, nous a permis d'établir un schéma général de traitement. On y procède par analyse successive des zones de sursol (en traitant en priorité les zones les plus fiables a priori), et par remise à jour des connaissances 2-D et 3-D de la scène au fur et à mesure de l'interprétation. L'interprétation des zones de sursol fonctionnera sur trois niveaux d'analyse, à complexité croissante : caractérisation grossière des plages de sursol en termes de contenu, puis extraction d'un ensemble d'objets 3-D élémentaires, simplement détectables et suffisamment fiables pour servir d'amorce à une restitution 3-D complète (3ème niveau).

L'ensemble de la démarche est illustrée par la figure C.1.3.2 :

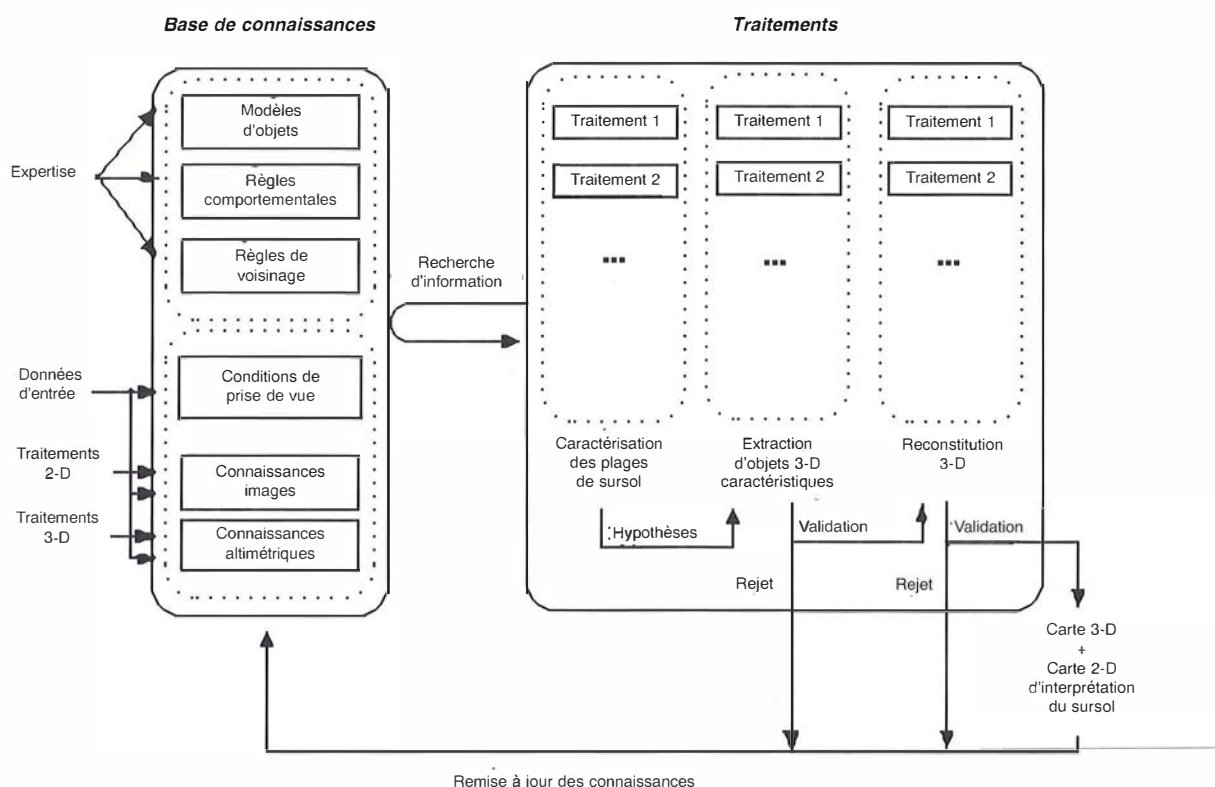


figure C.1.3.2 : schéma général de traitement

Deux éléments de ce système ont été abordés au cours de l'année 1995 : la constitution des éléments de la base de faits relatifs aux traitements 3-D (mise en correspondance, suppression du bruit et segmentation des disparités, extraction de zones de sursol) et le travail d'expertise (détermination de connaissances opératoires et spécification de quelques modèles d'objets).

Le travail de seconde année va consister à commencer la mise en place du système, l'objectif étant d'aboutir en fin d'année à un processus de restitution opérationnel dans le cas d'objets simples.

## Références

[BAILLARD et al 96] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Appariement stéréoscopique d'images aériennes en milieu péri-urbain*, RFIA 96, Rennes (F), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 960006/C-COM, janvier 1996.

## **Etude monoscopique du sursol**

Cette étude a commencé dans le cadre de l'action de recherche : Elimination du sur-sol isolé (1994); nous cherchons à caractériser la présence de sursol (ou de régions possédant du sursol) ainsi que la nature de ce sursol, à l'aide d'indicateurs texturaux et radiométriques. L'analyse de la nature du sursol est importante dans notre cas car une telle analyse rentre dans le cadre de la recherche sur la coopération d'algorithmes 2-D et 3-D pour la restitution du relief.

Nous n'avons pas voulu nous contenter d'une analyse des ombres (densité et formes) car une telle analyse dépend beaucoup de facteurs non constants tels que l'heure et la date de prise de vue, l'architecture régionale (un pignon prononcé sera source d'une ombre semblable à celle d'un conifère...). Nous avons donc décidé de nous polariser sur les formes des objets au sol et d'utiliser l'analyse des ombres comme amorçage de la première étude.

Le travail de cette année a porté sur la mise au point d'un indicateur textural de forme. L'idée est de fournir au niveau local une indication sur quelles sont les formes des objets présents au voisinage du point considéré : formes linéaires caractéristiques des zones bâties (ici on retrouve une direction principale modulo  $\pi/2$ ) ou bien formes circulaires ou chaotiques caractéristiques de la végétation naturelle. Nous avons donc décidé de caractériser ces formes en étudiant le comportement des gradients (au niveau de leurs directions) à l'intérieur d'une fenêtre centrée. L'indicateur basé sur l'étude entropique des directions de gradient au niveau local a été implanté. Des premiers résultats concernant la caractérisation des régions forestières sont prometteurs.

## **C.1.4 Applications semi-automatiques d'aide à la restitution de la BDTopo**

*par Sylvain Airault*

### **C.1.4.1 Introduction**

D'une façon générale, cette action de recherche se propose d'étudier le moyen de rendre opérationnelles des techniques déjà étudiées dans un cadre plus général soit au sein du laboratoire MATIS, soit dans d'autres organismes, en cherchant à les appliquer au contexte de la saisie BDTopo.

Dans l'état actuel d'avancement des recherches en interprétation de scène, le moyen le plus efficace pour espérer tirer profit des méthodes existantes est de chercher à les considérer comme des outils d'aide à la saisie dans des processus où l'opérateur conserve une place importante, gardant à sa charge les phases les plus complexes telles que l'initialisation des traitements (choix d'amorces, choix de paramètres) ou la validation de leurs résultats.

Dans ce but, l'action de recherche prend en charge tout ce qui concerne l'adaptation des méthodes au contexte opérationnel (notamment le choix de l'interaction) mais également la réalisation de prototypes et l'évaluation des méthodes produites en termes de respect des spécifications de la BDTopo, d'exhaustivité, et de temps de saisie.

### **C.1.4.2 Saisie du réseau routier**

#### **Contexte-Objectifs**

Les recherches concernant l'utilisation interactive de l'algorithme de suivi de routes du laboratoire en étaient déjà au stade du prototypage. L'année a été essentiellement consacrée à la réalisation de tests et à l'évaluation des résultats. Cependant, quelques études ont été menées parallèlement dans le but d'accroître l'efficacité de la méthode.

L'objectif est de mener en laboratoire de premières évaluations dans le but de proposer ensuite une étude préalable au passage en production qui se chargerait d'évaluer l'apport éventuel de la méthode à l'échelle de la saisie complète de la BDTopo, sur toute la France et dans les conditions réelles de production (opérateurs, machines, organisation).

#### **Évaluation du suivi de routes par homogénéité**

Le travail réalisé cette année était essentiellement tourné vers l'évaluation de l'algorithme de suivi de routes du laboratoire MATIS dans le contexte de son utilisation interactive. L'évaluation a porté sur trois critères : la qualité géométrique des réseaux extraits, l'exhaustivité et les temps de saisie.

Concernant la qualité géométrique d'un réseau extrait automatiquement, les résultats sont très satisfaisants. Un appariement ponctuel entre une saisie semi-automatique et une saisie manuelle donne un écart-type d'environ un mètre, soit à peu près le même ordre de grandeur qu'entre deux saisies manuelles [AIRAULT 84]. Cependant, les bons résultats statistiques ne doivent pas masquer le fait que certaines formes doivent localement faire l'objet d'une reprise manuelle.

Concernant l'exhaustivité, la proportion de réseau extrait automatiquement lors d'une saisie semi-automatique est très importante (70% à 90%) mais ce chiffre ne reflète pas le comportement réel du suivi de routes. En effet, ce pourcentage ne tient pas compte des arrêts fréquents sur des obstacles pour lesquels l'opérateur doit réorienter la détection.

Concernant les temps de saisie, les résultats sont un petit peu décevants, l'outil de suivi de routes ayant permis de gagner de 15% à 40% suivant les zones. Ces chiffres s'expliquent d'une part par une gestion non optimale des accès aux images (temps de lectures importants) mais surtout par les pertes de temps inhérentes à tout processus interactif.

Ces évaluations ont fait l'objet de deux publications [AIRAULT, JAMET 95c], [AIRAULT, JAMET 95a]. Elles sont encore insuffisantes et il sera nécessaire pour pouvoir conclure sur l'opérationnalité du suivi de routes de réaliser des tests à plus grande échelle en faisant varier des paramètres tels que le type de paysage (grand nombre de sites-test) ou l'opérateur effectuant la saisie.

## Développement du suivi par profil

A la fois dans le cadre de cette action et dans celui de la thèse de Ghislaine Bordes (voir C.1.3.3), un stage a été consacré au développement d'une méthode de suivi de routes par corrélation de profils radiométriques [NICOLA 95]. Dans le cadre de notre action, le critère de continuité du profil radiométrique a été intégré dans le suivi par recherche d'homogénéité. En effet, la corrélation de profils ne peut pas être utilisée pour contraindre la propagation (trop peu de connaissances spécifiques aux routes pour assurer la robustesse) mais peut être intéressante pour recalculer géométriquement le tracé conformément à un modèle. Le modèle de profil est initialisé par une recherche de bords parallèles dans un gradient et le recalage géométrique est ensuite réalisé par corrélation du profil courant avec le modèle de profil qui est alors mis à jour. On pouvait espérer un gain de précision ainsi qu'un gain de rapidité (la recherche de bords est combinatoire) mais l'amélioration n'est pas sensible.

## Extraction «tout-automatique»

Le but ici n'était pas de s'attaquer au problème de la restitution automatique du réseau routier mais seulement d'étudier dans quelle mesure on était capable d'extraire de façon fiable une partie du réseau routier en utilisant les outils existants (détection d'amorces et suivi de routes) avec des contraintes très fortes. Les critères utilisés pour filtrer les fausses détections sont les critères habituels utilisés par le suivi de routes (seuil en variance, seuil sur les changements brutaux de radiométrie, seuil sur la dispersion de l'arbre de recherche) mais également un critère de longueur des primitives extraites. En effet, de nombreuses zones apparaissent sur les images qui correspondent localement à notre modèle de routes (zone homogène, allongée, deux bords parallèles) mais pour lesquelles le suivi de route génère une hypothèse de faible longueur. La longueur des primitives extraites se révèle être un critère très sélectif à la fois pour seuiliser les fausses détections et pour hiérarchiser les hypothèses afin de déterminer un séquençage optimal pour introduire les primitives dans le graphe routier. En utilisant les amorces extraites automatiquement d'après un résultat de segmentation, on obtient en utilisant un seuil assez élevé (environ cinq cents pixels, c'est-à-dire deux cents mètres) un résultat loin d'être exhaustif mais comportant très peu d'erreurs. Aucune évaluation quantitative n'a été réalisée pour l'instant.

## Calcul du Z

Deux méthodes ont été développées au cours d'un stage [DUBREIL 95] dans le but de calculer des coordonnées tridimensionnelles à partir de la détection de routes monoscopique. La première méthode utilise une image de parallaxe externe au processus (obtenue par corrélation automatique) tandis que la deuxième propose un calcul local de la parallaxe au sein de l'algorithme de suivi.

La première méthode correspond à un problème de filtrage et de lissage des parallaxes existantes. En effet, les MNT issus de corrélation automatique sont statistiquement bons, notamment sur les routes, mais ils sont assez bruités et peuvent être localement entachés d'erreurs. La méthode proposée enchaîne donc une phase de filtrage des parallaxes aberrantes et une phase de lissage destinée à régulariser le profil en long de la route.

La seconde méthode propose de fiabiliser une mesure locale de corrélation en injectant dans le calcul des connaissances contextuelles sur ce que l'on connaît de la route : seuil sur la pente, corrélation entre fenêtres rectangulaires, poids plus forts au niveau des bords ....

Les deux méthodes donnent statistiquement des résultats à peu près identiques (de bons résultats) mais il faudra poursuivre les évaluations pour déterminer celle des deux qui présente le moins d'erreurs accidentelles.

Les deux méthodes ont été implémentées à la fois avec une résolution globale à partir d'un graphe routier complet et sur la plate-forme interactive pour un calcul du Z au fur et à mesure de la détection 2-D.

## Références

- [AIRAULT 94] S. Airault : *Evaluation de la qualité géométrique d'une restitution numérique par comparaison à des restitutions analytiques*, document interne, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940042/C-RAP, décembre 1994.
- [AIRAULT, JAMET 95a] S. Airault & O. Jamet : *Digital stereoplotting & automatic image interpretation : example of the road network capture*, 17th International Cartographic Conference, Barcelona (E), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950006/C-COM, septembre 1995.
- [AIRAULT, JAMET 95b] S. Airault & O. Jamet : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aériennes*, in *Traitement du Signal*, volume 12, n° 2-1995, numéro spécial RFIA 1994, été 1995, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950035/C-COM, 1995.
- [AIRAULT, JAMET 95c] S. Airault & O. Jamet : *Evaluation of the operationality of a semi-automatic road network capture process*, Digital Photogrammetry & Remote Sensing'95, SPIE, St-Petersburg (Russia), June 1995, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940043/C-COM, 1995.
- [DUBREIL 95] F. Dubreil : *Extraction du réseau routier en stéréoscopie*, rapport de projet pluridisciplinaire IT2, École Nationale des Sciences Géographiques, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950035/C-COM, septembre 1995.
- [NICOLA 95] S. Nicola : *Extraction automatique du réseau routier par suivi de profils sur images aériennes numérisées*, rapport de stage de fin d'études de l'Institut National des Télécommunications, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950034/C-STA, juin 1995.

### C.1.4.3 Bâtiments isolés

par Sylvain Airault et Philippe Guiavarc'h

#### Contexte - Objectifs

Concernant la restitution automatique des bâtiments, les méthodes explorées jusqu'à présent au laboratoire (Thèse Tuan Dang) ne semblaient pas permettre une adaptation aisée aux bâtiments de petite taille (pavillons pour lesquels certains bords sont à peine visibles dans les photographies au 1 : 20 000) sans inclure des connaissances contextuelles de haut-niveau dans le processus de restitution. En revanche, d'un point de vue opérationnel, il semblait intéressant d'étudier des approches qui soient plus contraintes par un modèle de bâtiment donné. Nous avons choisi d'étudier une approche qui consisterait à recalibrer dans les images un modèle simple de bâtiment (rectangle horizontal) en utilisant des critères de très bas-niveau. Le but est, en considérant une décomposition paramétrique du modèle (localisation, orientation, longueur, largeur, hauteur), d'évaluer pour chacun des paramètres quelle est la fiabilité de sa détermination et d'en déduire l'interaction la plus adaptée pour réduire les ambiguïtés.

Deux approches ont été menées parallèlement : l'une plus basée sur l'étude des radiométries, l'autre sur l'étude des disparités fournies par des corrélations locales.

#### Approche «radiométrique»

Cette première approche est basée sur l'exploitation des valeurs radiométriques, recherchant à recalibrer le modèle indépendamment dans les deux images et n'utilisant la contrainte d'horizontalité que pour valider un appariement entre deux hypothèses issues des deux images.

L'esprit de l'étude était d'évaluer la fiabilité de détermination des paramètres du modèle, indépendamment les uns des autres puis d'évaluer ensuite la fiabilité, connaissant l'un des paramètres, de la détermination des autres. Par manque de temps, l'étude n'a pas été aussi complète et le choix du séquençage a été fait a priori : détermination de l'orientation, puis de la localisation (connaissant l'orientation), puis de la longueur et de la largeur (connaissant les deux autres). Les évaluations montrent que les traitements bas-niveau utilisés sont compatibles avec la précision recherchée dans la mesure où les bâtiments ne présentant aucune ambiguïté sont restitués avec une bonne précision. En revanche, de nombreuses ambiguïtés interviennent sur la détermination des différents paramètres qui aboutissent (les erreurs se propageant) à des taux de reconnaissance assez faibles [DUCAS 95]. La solution envisagée pour éviter la propagation des erreurs et gérer les ambiguïtés est de conserver, pour chaque paramètre, une liste d'hypothèses et d'aboutir pour le modèle complet à un arbre d'hypothèses dans lequel il serait possible de calculer un chemin de coût minimum. Cette solution est en cours d'élaboration.



## Approche «corrélation»

La deuxième approche privilégie les hypothèses de hauteurs fournies par des corrélations locales, l'information radiométrique n'étant utilisée qu'à titre de contrôle.

Deux pistes ont été testées : la première idée consiste à réaliser une corrélation locale autour du sommet de bâtiment connu, ce qui permet, après un double seuillage par les parallaxes et par les coefficients de corrélation, d'obtenir une zone de pixels appartenant au bâtiment. On cherche ensuite à recalculer le modèle rectangle dans l'image seuillée des coefficients de corrélation.

La seconde idée consiste à calculer d'une part un gradient seuillé sur l'image de radiométries et, d'autre part, un masque de sursol à partir du MNT, et de faire localement autour du point connu du bâtiment l'intersection de ces deux images. Les pixels ainsi obtenus seront des pixels appartenant au bord du bâtiment. On cherche ensuite à recalculer le modèle rectangle dans cette image de pixels candidats.

Un simple jugement qualitatif des résultats ne permet pas de bien cerner les apports respectifs des deux critères. Il sera nécessaire de poursuivre avec des évaluations quantitatives.

## Références

[DUCAS 95] V. Ducas : *Extraction semi-automatique de bâtiments dans un couple stéréo d'images aériennes*, rapport de stage du DEA VAR, INRIA Sophia Antipolis, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950036/C-STA, juin 1995.

### C.1.4.4 Courbes de niveau

par Edouard Beauvillain, Philippe Guiavarc'h et Olivier Jamet

## Contexte - Objectifs

Les études sur l'opportunité de passer dès maintenant à un processus de production automatique de courbes de niveau en production ont été déléguées au service de production concerné et le rôle du laboratoire MATIS sur cette application à court terme s'est réduit à des tâches d'expertise ou de «sous-traitance» pour certains traitements liés à l'étude. Par ailleurs, différents tests sur le corrélateur du laboratoire MATIS ont été réalisés, destinés avant tout à faire évoluer ce produit pour son utilisation interne.

## Évaluation d'un MNT par comparaison à des données BDTopo

Un travail entamé l'an dernier a été poursuivi concernant la définition d'une méthodologie d'évaluation de la qualité d'un modèle numérique de terrain par comparaison à des données de référence BDTopo. Il ne s'agit pas de mener des recherches générales sur la qualité des modèles numériques de terrain mais bien de définir une méthodologie même très imparfaite pour répondre à des besoins immédiats.

La méthodologie proposée [BEAUVILLAIN, JAMET 94] évalue statistiquement les écarts entre le MNT à évaluer et le Z des courbes de niveau de la BDTopo ainsi que les écarts entre le MNT à évaluer et le Z des objets planimétriques de la BDTopo.

## Fabrication et évaluation de MNT pour l'étude préalable RAAO

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'étude préalable du projet RAAO (Projet de Restitution Altimétrique Assistée par Ordinateur) mené par Alain Dupéret au cours de son cycle Ingénieurs Géographes. Le but de ce projet était entre autres de réaliser une étude comparative sur le comportement de différents corrélateurs en fonction de critères de paysage et de relief, et d'étudier les différentes manières de dériver des courbes de niveau à partir des MNT ainsi obtenus.

Le travail confié au laboratoire MATIS comporte trois parties :

- Calcul de MNT par corrélation automatique sur quatre couples tests, chacun de ces couples étant représentatif d'un certain type de paysage (bocage, urbain, montagne, forêt...). Le corrélateur utilisé était le corrélateur ponctuel Dauphin de Patrick Julien. Des traitements dédiés à la détection et à l'élimination du sursol ont ensuite été appliqués sur ces MNT.

- Évaluation des MNT [BEAUVILLAIN, GUIAVARC'H 95] provenant des trois corrélateurs testés : le corrélateur Dauphin, le corrélateur de Jean Ducloux et le corrélateur Helava. L'évaluation des MNT se fait par comparaison avec la BDTopo, en calculant l'écart entre l'altitude de chaque sommet de la BDTopo et l'altitude du même point interpolée dans le MNT.

- Détection automatique des lignes caractéristiques (crêtes et thalwegs) à l'aide des programmes de Olivier Jamet sur les MNT provenant des différents corrélateurs, lissage des MNT en introduisant des contraintes sur les éléments caractéristiques afin d'en dériver finalement les courbes de niveau.

Cette expérience a permis de tester les méthodes de calcul de relief en grandeur nature, c'est-à-dire sur des couples entiers, sans se limiter comme cela est souvent le cas lors des phases expérimentales à des petites zones d'essai.

Ces différents tests ont permis de montrer que, globalement, les comportements des différents corrélateurs testés n'étaient pas trop éloignés les uns des autres.

## Tests d'évolution sur le corrélateur DAUPHIN

Cette action s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'automatisation de la restitution du relief pour la BDTopo. Le but de cette étude était de tester le comportement du corrélateur Dauphin [GUIAVARC'H et al 95] avec de nouvelles définitions de paramétrages, ainsi qu'avec de nouveaux modes de gestion de l'évolution des paramètres, ou bien encore avec l'introduction de données extérieures, sans pour autant modifier le fonctionnement interne du corrélateur.

On peut citer quelques axes sur lesquels nous avons porté plus particulièrement notre attention :

- L'influence des paramètres de base de la corrélation tel que le critère de pente, la résolution des images, la résolution de corrélation (multi-résolutions successives, ou bien encore résolutions différentes suivant les zones).

- L'influence de la taille de la fenêtre de corrélation, et de sa gestion (fenêtre croissante ou décroissante). Les résultats obtenus ici ont été contradictoires, allant d'un gain sur le temps de calcul et sur la précision à totalement l'inverse.

- Dans l'hypothèse où la restitution de la couche planimétrique de la BDTopo était disponible avant la restitution altimétrique, on a envisagé l'intégration avant la corrélation de différents éléments de la BDTopo, sous deux formes distinctes. D'une part l'intégration d'éléments linéaires situés au sol (limites de culture, routes, chemins...) afin de contraindre la corrélation au sol sur ces éléments, et d'autre part l'intégration d'éléments surfaciques (bâtiments, zones de végétation, forêts, lacs...) afin d'interdire la corrélation sur ces zones. Des améliorations importantes ont été ressenties d'une part car le corrélateur avait à quoi se raccrocher dans les zones difficiles, et d'autre part en raison de la non-existence de sursol au départ. Par ailleurs les résultats étaient inchangés dans les zones sans problèmes particuliers.

- La gestion assistée des paramètres suivant le pourcentage et la vitesse de corrélation instantanée. On peut ainsi choisir des paramètres relativement contraignant, car ceux-ci seront relâchés si le corrélateur ne va pas assez vite. Cela a permis un gain de temps et une plus grande souplesse dans l'introduction des paramètres.

Ces tests ont démontré l'influence des différents éléments précédemment cités, mais il n'a pas été possible d'en déduire une stratégie globale valable pour tous les couples. En effet chaque type de terrain étant un cas particulier, et le nombre d'options possibles étant très grand, il est très difficile de généraliser.

## Lissage cartographique

Dans le cadre de l'expérimentation conduite par Alain Duperet, visant à comparer les résultats des méthodes de calcul automatique de courbes de niveau (par corrélation automatique et lissage) avec des saisies manuelles, nous avons développé une technique de lissage destinée à préserver la précision des résultats de corrélation sur les éléments caractéristiques du terrain.

La méthode proposée repose sur les constatations suivantes :

- l'exactitude altimétrique souhaitée conduit à mettre en œuvre les algorithmes de corrélation automatique sur des images de résolution assez fine (de l'ordre du mètre),

- le niveau de détail de la représentation cartographique par courbes de niveau, quant à lui, correspond à une résolution beaucoup plus faible (pour une représentation du relief sous forme de MNT, un pas d'échantillonnage correct se situe entre vingt et cent mètres, suivant la nature du relief).

Nous supposons donc que la forme du terrain pourra être obtenue par un simple lissage homogène isotrope du MNT issu de corrélation automatique à haute résolution (et corrigé du sursol). Ce processus va dégrader la précision sur les éléments caractéristiques du terrain, comme en particulier les extrema. Pour compenser cet effet, nous proposons d'appliquer une déformation à la surface lissée de façon à lui imposer des points ou des lignes de passage par des éléments connus par ailleurs.

Mathématiquement, on formule le problème de la manière suivante :

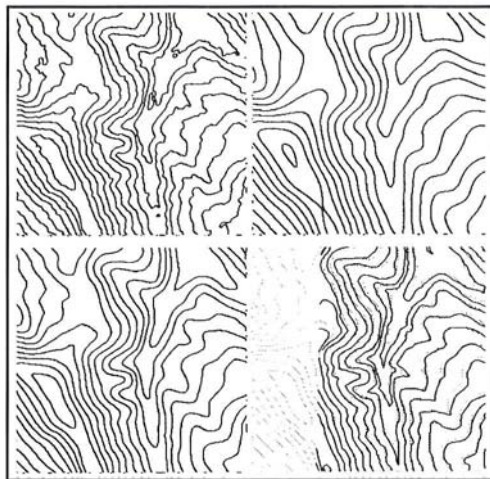
- soit  $Z(l, x, y)$ , la surface obtenue par lissage de paramètre  $l$  du MNT issu de la corrélation ( $l = 0$  : pas de lissage,  $l$  peut être par exemple l'écart-type du filtre gaussien utilisé pour le lissage),

- soit  $l_0$  le paramètre de lissage choisi comme adapté à la résolution souhaitée.

On cherche la surface  $S(x, y)$  passant par les éléments connus (lignes caractéristiques, points cotés...) et minimisant la fonction suivante pour la valeur,  $l = l_0$  :

$$F(l) = \int_y \int_x \frac{(\partial S / \partial x - \partial Z / \partial x)^2}{\partial^2 Z / \partial x \partial l} + \frac{(\partial S / \partial y - \partial Z / \partial y)^2}{\partial^2 Z / \partial y \partial l} dx dy$$

Concrètement, cette formulation signifie que l'on considère que la surface  $Z(l_0, x, y)$  donne une bonne approximation des pentes du terrain (dérivées premières de la surface). On cherche donc la surface  $S$  qui passe par les éléments connus (contraintes externes) et qui minimise la somme des carrés des écarts entre les pentes calculées sur  $S$  et les pentes calculées sur  $Z$ . Les dénominateurs sont des coefficients de pondération exprimant la certitude que l'on a sur les pentes estimées sur  $Z$ . Cette certitude est supposée fonction de la dérivée des pentes par rapport au paramètre de lissage.



**figure C.1.3.3** : exemple de lissage cartographique

(Extrait de la feuille d'Agen : échelle de reproduction 1 : 50 000 - équidistance 5 mètres.

Haut - gauche : le MNT issu de corrélation automatique,

Haut - droite : après un lissage gaussien (résolution équivalente 100 mètres),

Bas - gauche : réajustement du MNT lissé sur les lignes caractéristiques,

Bas - droite : courbes de niveau manuelles (en noir; résultat du réajustement en gris clair).

En pratique, on adopte une formulation discrète. Le MNT est calculé au pas de cinq mètres. Le lissage est un lissage gaussien dont l'écart-type est choisi en fonction de la fréquence de coupure souhaitée (résolution finale des données). Les éléments caractéristiques sont des lignes de crêtes et de thalwegs extraites automatiquement sur le MNT issu de corrélation, et caricaturées par un algorithme de la corde. La dérivée par rapport au lissage des pentes est obtenue par différence entre deux lissages proches. La fonction  $S$  réalisant l'optimum de  $F$  est calculée par la méthode des gradients conjugués.

La formulation adoptée reste empirique. Si les résultats obtenus ont été jugés visuellement satisfaisants (figure ci-dessus) par le personnel de production, il est probable que d'autres critères de lissage (minimisation des courbures par exemple) seraient tout aussi fonctionnels. On peut également discuter l'intérêt d'une recherche d'un optimum sous contraintes, opposable à la prise en compte des lignes caractéristiques comme des attracteurs rentrant dans la formulation de la fonction à optimiser. Cette option a été choisie pour permettre l'intégration de saisie manuelle des lignes caractéristiques, que l'on ne souhaiterait alors pas modifier. Elle est moins justifiée dans le cas de saisies automatiques, qu'il faut de toute façon également filtrer.

Il n'y a actuellement pas de suite prévue pour cette recherche. L'étude d'Alain Duperet débouche sur une proposition d'industrialisation du procédé. Il convient d'avancer ces travaux d'implantation et de test en production pour juger des besoins réels. Sur le plan théorique, on peut attendre l'avancée des travaux de Gil Gonçalves (thèse commencée fin 1995 pour juger des améliorations possibles pour les procédures de lissage de relief.



## Références

[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», bulletin de la SFPT n° 137, pp. 108-112, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 940020/C-COM, décembre 1994.

[BEAUVILLAIN et al 95] E. Beauvillain, P. Guiavarc'h & O. Jamet : *Evaluation d'un processus automatique de production de courbes de niveau*, rapport interne, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950032/C-COM, septembre 1995.

[BEAUVILLAIN, GUIAVARC'H 95] E. Beauvillain & P. Guiavarc'h : *Evaluation d'un processus automatique de production de courbes de niveau*, 17th International Cartographic Conference, Barcelona (E), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950020/C-COM, septembre 1995.

[GUIAVARC'H et al 95] P. Guiavarc'h, E. Beauvillain & O. Jamet : *Production automatique de courbes de niveau à partir de photographies aériennes*, 17th International Cartographic Conference, Barcelona (E), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, SR 950031/C-COM, septembre 1995.

### C.1.5 Contrôle linéaire

*Yyad Abbas et Philippe Hottier*

Les études se sont activement poursuivies en 1995; on sait que la méthode du contrôle linéaire permet d'estimer la précision planimétrique d'une carte (ou d'une base de données géolocalisées) par comparaison à une référence (en principe plus précise); elle fournit deux chiffres : d'une part le pourcentage d'accord du trait-carte et du trait-nominal et d'autre part sur les parties en accord une estimation de la classique erreur moyenne quadratique. Elle est basée sur l'utilisation de la distance de Hausdorff et consiste à comparer des couples (objet carte - objet référence), par exemple des tronçons «homologues» de quelques centaines de mètres ou des contours d'ilôts dans les centres urbains. Les paramètres de dimension et de forme sont éliminés au moyen de simulations. La méthode est itérative : on part toujours d'une emq-carte assez élevée (par exemple trente mètres pour la BDCarto) et on calcule par simulation les tolérances sur les deux composantes de la distance («distance» de l'objet-carte à l'objet-référence et «distance» de l'objet-référence à l'objet-carte); on coupe alors les détails hors tolérance et on recommence les calculs.

La méthode a été appliquée avec succès à la BDCarto; mais on considérait alors comme inévitable une phase interactive consistant à couper à l'écran les détails hors tolérance; sous l'impulsion de Benoît David et Yyad Abbas une tentative d'automatisation de cette phase a eu lieu et semble avoir été couronnée de succès : l'idée était d'opérer toujours et seulement à partir de l'objet-carte d'ordinaire moins détaillé que l'objet-référence et de couper les détails hors tolérance légèrement en amont et légèrement en aval (cette précaution accélère beaucoup la convergence).

Mais des essais tout récents semblent montrer qu'on peut opérer, comme dans la méthode interactive des deux côtés : non seulement de la carte vers la référence mais aussi de la référence vers la carte; ceci se fait en considérant à la fois la fonction plus courte distance  $d$  d'un point du premier contour au second et sa dérivée par rapport à l'abscisse curviligne sur le premier contour ou encore le coefficient de variation de  $d$  (compris entre - 1 et + 1); il semble alors possible de définir une typologie des détails; par exemple sur le contour-carte :

- détails normaux : en accord avec la référence donc avec le tracé nominal,
- détails «justement généralisés» : un détail-carte est justement généralisé s'il est quasi-rectiligne, si sa longueur est inférieure à  $L$ , et si son coefficient de variation présente un saut à ses extrémités; un détail «justement généralisé» est considéré comme en accord avec le tracé nominal,
- détails non appairables: détails entièrement hors tolérance, ou bien partiellement hors tolérance mais présentant un fort coefficient de variation sur une longueur supérieure à  $L$ ,
- détails hors tolérance : les autres ....

Il n'y a que deux paramètres à introduire dans un tel algorithme : la longueur maximale du détail justement généralisable  $L$  (de l'ordre de 30 emq, emq désignant l'erreur moyenne quadratique planimétrique a priori ) et la valeur limite du coefficient de variation.



## **C.2.1 Nouvelles technologies pour la télémétrie laser satellite**

*par Michel Kasser*

### **Contexte**

La télémétrie laser sur satellites est actuellement une des méthodes de base qui participe à la définition à long terme d'un référentiel géodésique mondial de très grande précision (avec le VLBI, le GPS, DORIS etc...). Mais en outre cette méthodologie, qui est mise en oeuvre actuellement dans une trentaine de stations lourdes de par le monde et qui concerne près d'une vingtaine de satellites, a la particularité exclusive de travailler dans le domaine optique. Ceci a pour conséquence une certaine difficulté à garantir des observations régulières (le mauvais temps interdit toute mesure, ce qui empêche par exemple son emploi dans les pays de la zone équatoriale), mais en contrepartie permet une grande insensibilité aux paramètres mal connus caractérisant l'atmosphère (température, pression de vapeur d'eau). Cette méthodologie est de ce fait intéressante à perfectionner pour atteindre des possibilités de mesurer des altitudes "absolues" (référencées avec une très grande précision sur le centre des masses de la Terre). Les enjeux scientifiques vont de l'étude du réchauffement global de la Terre (avec la fonte des glaces polaires et donc l'élévation du niveau moyen des mers) à l'étude tectonique des zones sujettes à de grands mouvements (surrexion alpine, subsidence des grands bassins). L'objectif est alors la définition de repères altimétriques indépendants des problèmes de mouvements locaux ou tectoniques, et donc permettant une interprétation facile des résultats de réobservations altimétriques.

### **Objectifs**

Les objectifs de cette recherche visent à améliorer une des sources majeures d'imprécision des stations de télémétrie laser sur satellites, à savoir les instabilités dans les biais de mesure. Il a donc été recherché comment mettre au point une nouvelle technique de télémétrie :

- qui réemploie l'ensemble des éléments d'une station fixe de type classique,
- qui soit totalement débarrassée des biais de mesure et donc ne risque pas d'avoir une origine fluctuante.

### **Résultats actuels**

Cette recherche a pris la suite des travaux réalisés sur la télémétrie laser satellites au sein du laboratoire LOÉMI, en collaboration étroite avec l'Observatoire de la Côte d'Azur, CERGA, Grasse (F), le CNES et l'INSU. Elle intervient également à la suite des travaux menés il y a quelques années sur le prototype de télémètre laser terrestre Georan II étudié au laboratoire LOÉMI et abandonné depuis lors compte tenu des progrès du GPS. Disposant du savoir-faire nécessaire à la réalisation d'un dispositif de modulation/démodulation de faisceau permettant des mesures de distances totalement exemptes d'erreurs instrumentales, le laboratoire LOÉMI a souhaité, en liaison avec d'autres équipes d'instrumentation SLR, tant françaises (CERGA) qu'étrangères (NASA, IfAG), appliquer cette méthodologie au SLR. A cette fin le début de cette étude a été lancée en 1995 au laboratoire LOÉMI. Il en ressort un certain nombre de points déjà certains, et en particulier qu'il est possible de procéder à une restitution d'orbite débarrassée de tout biais de mesure sans changer de façon lourde la conception globale d'une station de télémétrie laser sur satellites. Les modifications portent sur le laser (réglage différent des mêmes composants, études complémentaires à effectuer mais peu d'aléas a priori), et sur l'installation d'un modulateur à très haute fréquence.

## Suites envisagées

Les premiers tests vont porter sur le système de modulation-démodulation sélectionné afin de vérifier qu'il est capable de tenir les spécifications de flux optique (très élevé) et de stabilité en routine; et il y a toute une série d'essais auxquels il faudra procéder pour valider des aspects techniques qui restent inconnus des fournisseurs de modulateurs électro-optiques. C'est l'objet du travail de 1996, conjointement avec la poursuite d'une étude de la dépolarisation de la lumière apportée par les réflecteurs montés sur les satellites (qui par chance sont à peu près tous du même type). Cette étude a été commencée en 1995 de façon expérimentale et doit être complétée par une analyse théorique qui reste assez délicate à valider.

Compte tenu des particularités de la station SLR fixe de Grasse (qui dispose d'un grand télescope de un mètre de diamètre), et des interventions nécessaires sur sa partie mécanique (qui est à ce jour en assez mauvais état), l'OCA a prévu de longue date de procéder à une remise en état de la tourelle. D'autre part la nouvelle répartition des stations de SLR fixes en Europe rend tout à fait acceptable l'idée de l'employer pendant une durée limitée dans le temps comme un laboratoire d'essais de nouvelles technologies. Celle que nous voulons mettre au point semble une bonne option pour l'avenir du SLR, avec comme objectif de faire disparaître complètement les erreurs instrumentales du processus de mesure. Cette méthodologie est également en discussions à la NASA et à l'IfAG (Francfort), mais notre équipe est très bien placée pour apporter une contribution majeure à cet effort actuel.

## Références

[KASSER, PIERRON 88] M. Kasser & F. Pierron : *Nouveaux projets de la station de télémétrie laser de haute mobilité*, Colloque sur la mission du satellite TOPEX-POSEIDON, Centre spatial de Toulouse, CNES, 1988.

[KASSER, PIERRON 89] M. Kasser & F. Pierron : *The French highly mobile laser system*, Laser Workshop, Matera, octobre 1989.

[KASSER, PIERRON 91a] M. Kasser & F. Pierron : *The French highly mobile laser system*, AGU, San Francisco (USA), August 1991.

[KASSER, PIERRON 91b] M. Kasser & F. Pierron : *Developpement d'une station très compacte de télémétrie laser sur satellites*, ICSSO'91, Conférence Internationale d'Optique Spatiale, Toulouse (F), septembre 1991.

[KASSER, PIERRON 92] M. Kasser & F. Pierron : *The French highly mobile laser system*, 8th Symposium on Laser Ranging Instrumentation, Annapolis, 18-22 mai 1992.

[PIERRON, KASSER 94] F. Pierron & M. Kasser : *The French FTLRS*, 9th Symposium on Laser Ranging Instrumentation, Canberra, Australie, 7 to 11 November 1994.

## C.2.2 Exploitation cartographique d'images radar

par Sylvia Sylvander et Patrick Gigord

### Contexte/objectif/enjeu

Depuis l'automne 1993, l'action de recherche relative à l'exploitation cartographique d'images radar est menée par deux ingénieurs d'IGN Espace. Elle a pour objectif d'évaluer les possibilités cartographiques offertes par l'imagerie satellitaire radar. Le programme mis en œuvre s'efforce de concilier : recherche expérimentale, développement de logiciels opérationnels et formation du personnel exploitant. Cette politique a permis d'adapter la chaîne de production d'ortho-images d'IGN Espace et de s'engager dans le projet de couverture exhaustive de la Guyane en spatio-cartes ERS au 1 : 200 000. Ce projet, financé en grande partie par la Division des Missiles et de l'Espace (DME), et d'autres projets, à l'étude à la demande du Centre Géographique Interarmées, contribueront à renforcer la notoriété d'IGN Espace. Prochainement, les images délivrées par RADARSAT seront disponibles. De part ses caractéristiques techniques, ce satellite sera plus apte à satisfaire les besoins cartographiques; la demande commerciale devrait donc croître. Conçus pour évoluer, les logiciels réalisés pour traiter ERS s'adapteront facilement à RADARSAT; IGN Espace pourra alors répondre à cette demande.

### Activités/résultats

Les objectifs de l'année ne sont pas atteints. Les raisons de cet échec sont autant d'ordre structurel que conjoncturel. Intégrés à IGN Espace, nous n'avons pas pu abandonner les activités générales d'expertise en géométrie des images pour nous concentrer sur les activités spécifiques au radar. Dans le cadre de la préparation de l'examen d'analyste, Sylvia Sylvander a été affectée de manière prioritaire à un autre projet pendant plus de cinq mois. Patrick Gigord a été affecté au CNES à partir du mois de novembre; auparavant il avait dû assumer quelques mois une partie des activités de Chef de Département. Les congés maternité et maladie ont fait le reste ....

Grâce à l'aide financière de la DME et de la Cellule d'Etudes de Géographie Numérique (CEGN) (achat de vingt images ERS), nous avons pu valider une technique originale permettant de localiser des détails terrestres à partir de couples stéréoscopiques ERS montant/descendant [Sylvander, Gigord 95]. Cette étude nous a obligé à identifier et gérer toutes les variantes de format des produits ERS. En revanche, elle a permis aux photo-interprètes d'IGN Espace de faire d'énormes progrès dans la compréhension de l'imagerie radar : 46 couples ont été traités, 485 points de référence (issus de cartes ou de SPOT) ont fait l'objet de 1340 mesures stéréoscopiques ! La performance de localisation déduite de ces mesures est caractérisée par deux types de facteurs :

- une translation d'ensemble de chacun des couples (erreur de localisation absolue), qui résulte de la méconnaissance des paramètres de prise de vue; sur l'ensemble des couples, les valeurs maximales sont inférieures à 50 mètres en X, Y et Z et les moyennes quadratiques sont de 27 mètres en planimétrie et 34 mètres en altimétrie,
- une erreur aléatoire (cohérence interne) liée à la précision d'identification - pour la planimétrie - et à la précision d'appariement - pour l'altimétrie - ; sur l'ensemble des points, les moyennes quadratiques sont de 20 mètres en planimétrie et 4 mètres en altimétrie.

Comparée à celle fournie par les techniques GPS, la précision de localisation que nous obtenons peut paraître médiocre. Il convient donc d'insister sur le fait que notre technique ne nécessite aucun déplacement sur le terrain !

Les travaux de 1994 sur l'interférométrie sont restés sans suite. Le peu de temps investi dans la radargrammétrie a concerné, d'une part la conception d'un algorithme général de calcul des épipolaires (compatible radar/optique), et d'autre part l'analyse logicielle (en vue de l'adaptation à ERS) du corrélateur Dauphin fourni par Patrick Julien. Ces travaux n'ont pas débouché sur des résultats concrets.

La collaboration engagée avec le Laboratoire Commun de Télédétection (LCT) CEMAGREF/ENGREF, voir article commun [STUSSI et al 95], nous a permis de bien comprendre les besoins des thématiciens relatifs aux corrections radiométriques des effets de relief. En cas de demande commerciale, l'adaptation de la chaîne opérationnelle pourra être réalisée rapidement.

Enfin, un temps non négligeable fût consacré à la mise au point et à la discussion (ou à la négociation) de projets qui se concrétiseront à partir de 1996 :

- étude financée par le CNES dans le cadre du GATT (définition des radars futurs); elle concerne la comparaison, par photo-identification, du contenu planimétrique d'images acquises en bande C ou X et de résolutions comprise entre deux et dix mètres,

- candidature à l'ADRO (projets pilotes RADARSAT); notre proposition a été retenue, elle comporte trois volets : comparaison de différentes configurations stéréoscopiques à l'aide de points de référence observés visuellement, idem par corrélation automatique - ce point est critique -, évolution du contenu planimétrique en fonction de la résolution et de l'angle d'incidence et apport de la fusion multi-incidence; nous avons demandé un soutien financier au CNES dans le cadre d'AVALSAR (hauteur maximum 50%),

- collaboration avec le Groupe De Recherche 134 en relation avec le PNTS; nous intervenons comme experts-cartographes pour donner un avis critique sur l'intérêt, les avantages et inconvénients de différentes techniques de géocodage, filtrage ou fusion d'images développées par les chercheurs du groupe.

## Perspectives

A partir de l'année prochaine, les activités relatives à l'exploitation cartographique d'images radar seront réorganisées :

- les travaux de recherche au sens strict devraient être repris à Saint-Mandé. Le personnel chargé de ces travaux reste à nommer. Il trouvera, au sein du Service de la Recherche, un support méthodologique et un environnement de travail stable indispensables pour mener à bien les tâches de longue haleine que représentent les études relatives à l'interférométrie et à la radargrammétrie,

- IGN Espace devrait conserver les moyens nécessaires pour mener à bien les tâches suivantes :

- fourniture d'informations amont aux chercheurs (résultat de spatiotriangulation...),
- suivi des travaux de recherche en vue de limiter le délai de transfert à la production,
- adaptation de la chaîne opérationnelle aux futurs satellites (dans l'immédiat à RADARSAT),
- réalisation de toutes les expérimentations à base de photo-identification (expérience utile pour la production).

## Publications

[SYLVANDER, GIGORD 95] S. Sylvander & P. Gigord : *Apport de l'imagerie ERS à la localisation de détails terrestres*, rapport d'étude rédigé pour la DME et la CEGN, SR 950019/R-RAP, 1995.

[STUSSI et al 95] N. Stussi, A. Baudoin T. Castel & P. Gigord : *Radiometric correction of multi-configuration spaceborne SAR data over hilly terrain*, Symposium international : Extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres, Toulouse (F), 1995.

### C.2.3 Emploi en métrologie de cartes GPS consommables

par Michel Kasser

#### Introduction

L'objectif de cette étude était d'évaluer au laboratoire LOÉMI la possibilité d'emploi de cartes GPS à très bas coût afin de s'en servir dans des applications de métrologie géodésique continue. Une telle disponibilité sera en effet d'un grand intérêt pour le suivi d'ouvrages d'art, de zones géologiquement actives (glissements de terrain par exemple). Les éléments à tester étaient donc la précision des mesures de bases courtes (de l'ordre du kilomètre), a priori largement compatibles avec des mesures sur une seule fréquence. Ultérieurement, lorsque des essais satisfaisants en terme de précision auront été obtenus, un conditionnement particulier adapté à de telles missions sera mis au point.

#### Travaux effectués, conclusions

La totalité des travaux de recherche prévus a été finalement menée au sein de l'Ecole Supérieure des Géomètres Topographes, en bénéficiant du travail de fin d'études de Frank Rochette, élève de troisième année, et destiné nominaleme nt au guidage de l'avion photographe télécommandé de l'école. Le matériel permettant d'atteindre les objectifs de métrologie n'était pas encore en 1995 du domaine du consommable : les nombreuses cartes électroniques disponibles en OEM à bas prix (quelques milliers de francs) et dont un inventaire détaillé (très malaisé compte tenu du faible nombre d'éléments techniques disponibles dans les fiches descriptives des constructeurs) a été effectué, ne disposaient alors pas de la mesure de la phase, nécessaire sur ce projet. L'étude va se poursuivre en 1996 dans le même cadre, un matériel nouveau annoncé chez Trimble devrait faire l'affaire et sera évalué en 1996 à l'ESGT. Dès qu'une solution suffisamment précise sera identifiée, la suite de cette recherche reprendra au sein du laboratoire LOÉMI.



## **Introduction**

*par Sylvie Lamy*

Le bilan de recherche du laboratoire COGIT de 1995 s'inscrit dans la continuité de celui de 1994. La répartition des activités de recherche entre la recherche en cartographie (généralisation et placement des écritures) et en base de données géographiques est restée stable, de l'ordre de 60% pour le premier groupe. Parallèlement, l'ouverture vers l'extérieur s'est maintenue avec notamment la poursuite de la contribution du laboratoire au Programme National sur les SIG (PNSIG), les visites de chercheurs étrangers invités et la participation importante à des projets européens.

## **Généralisation : articulation et finalités des recherches**

Concernant la généralisation indépendante (objet par objet), il a été au départ choisi de donner la priorité aux petites échelles, en particulier au 1 : 100 000. A ce titre, l'effort a porté sur le linéaire (environ 80% du contenu à ces échelles) et plus particulièrement sur le routier. Initialement, ce qui était disponible dans la littérature se résumait à une collection d'algorithmes de simplification et de lissage.

Or, les composants du problème sont de trois ordres :

- les outils de simplification et de lissage ne suffisent pas pour généraliser convenablement le linéaire aux petites échelles. On est conduit à faire des compromis sur la qualité et le taux de reprises interactives (lorsqu'elles restent possibles) est élevés,
  - aucun algorithme simple ne permet de généraliser de façon systématique : il est nécessaire d'appliquer différents outils avec différents réglages suivant la forme locale de l'élément,
  - pour appliquer le bon outil au bon endroit, il faut être capable d'analyser, segmenter et qualifier ces éléments.
- Cette étape s'appuie sur des mesures, qui servent par ailleurs à contrôler les effets obtenus.

Pour le linéaire, la première étape a consisté à intégrer sur une plate-forme commune, des outils de généralisation en les améliorant, ainsi que les premiers outils de segmentation et de mesure (se reporter à l'article B.3.2 en première partie du bulletin d'information). Il reste à faire de nombreuses expériences afin de progresser dans la voie de l'automatisation de l'outil.

De plus un certain nombre de points n'ont été que peu abordés : la généralisation d'autres types de réseau, comme l'hydrographie qui a la particularité de mêler le linéaire et le surfacique, ou des données zonales (comme les unités administratives). Au-delà, et en particulier lorsque l'on considère des éléments comme le bâti, il faudra prendre en compte les aspects contextuels : les opérations de généralisation dépendant en effet à la fois d'un objet mais aussi de ses voisins (par exemple pour éviter une superposition, ou préserver des alignements). Ces actions de recherche devraient à moyen ou long terme permettre de déterminer l'ordre des opérations et le mode de résolution des conflits. Mais des résultats partiels pourraient être à court terme utilisés (voir article B.3.3).

## **Placement des écritures**

L'industrialisation des algorithmes de placement des écritures horizontales se poursuit ; celle-ci devrait être prolongée dans les deux prochaines années par le placement d'autres types d'écritures, notamment des hydronymes.

## **Bases de données géographiques : articulation et finalités des recherches**

Le point commun entre les trois axes de la partie base de données géographiques (multi-échelles, historique et précision) est de concevoir, intégrer des modélisations des données géographiques plus riches que celles actuellement disponibles.

Des expériences sont de plus essentielles pour démontrer la validité et l'intérêt des principes retenus :

- une première base multi-échelles a été constituée, mettant en oeuvre les liens de correspondance et des mécanismes d'appariement a ainsi été intégrée (voir article B.3.1),
- la recherche sur l'historique a été surtout applicative, avec la réalisation dans le cadre d'un contrat d'un prototype de gestion de l'historique par versionnement, développé sur GéO<sub>2</sub>,
- enfin, des études statistiques sur des données de la BDTopo, amorcées en 1995, devraient valider le modèle de précision géométrique développé.

## C.3.1 Modèle d'historique pour l'information géographique

*par Laurent Raynal*

### Introduction

Un modèle d'historique pour l'information géographique doit permettre de structurer dans la base de données la prise en compte des évolutions du terrain et de structurer les documents sources.

- La description des modifications dans la base de données doit être suffisamment exhaustive pour être utile au plus grand nombre d'applications.
- La documentation qui justifie les mises à jour doit être intégrée à l'historique. La connaissance des sources est un élément important pour la reprise des erreurs et la qualification de l'information géographique.
- Le processus de mise à jour ne doit pas laisser la base dans un état incohérent. Par exemple, si un regroupement de communes a lieu sans mise à jour de la nouvelle mairie, la contrainte d'intégrité «une seule mairie par commune» ne sera pas respectée. La fusion des communes, la suppression des anciennes mairies ainsi que l'insertion de la nouvelle doivent donc être rassemblées en une seule transaction.

### Réalisations

Les travaux réalisés en 1995 se sont concentrés à la fois sur la définition des opérations de journalisation pour les primitives géométriques et topologiques et sur la réalisation d'une étude sous contrat concernant la gestion du temps dans une base de données de renseignements militaires. Cette dernière a permis en particulier d'appréhender les caractéristiques d'un modèle de version.

#### *Définition des opérations de journalisation pour les primitives géométriques et topologiques*

En suivant le modèle de GéO<sub>2</sub> (avec trois niveaux de structuration emboîtés Spaghetti, Network et Map), une définition des opérations de journalisation pour les primitives géométriques et topologiques a été réalisée. Par exemple, sur un point dans une structure Spaghetti, outre les opérations de création et destruction, on peut déplacer ce point, fusionner deux points aux coordonnées communes ou dédoubler ce point. Pour un arc, on considérera les opérations de destruction, de création, d'ajout de point intermédiaire et de retrait de point intermédiaire, de fusion et de scission d'arc, et enfin de déplacement d'un point. Les primitives topologiques hériteront des opérations sur les primitives géométriques auxquelles on ajoutera les opérations de connection, déconnection entre un nœud et un arc. Un rapport a été écrit à ce propos [SCHORTER 95]. Cependant, la mise en oeuvre sur GéO<sub>2</sub> en accord avec le modèle de mutation sémantique pose quelques problèmes qui n'ont pu être qu'effleurés actuellement.

#### *Gestion du temps dans une base de données de renseignements militaires*

Cette étude a été décomposée en deux phases : en premier lieu, elle a consisté à analyser les "points durs" liés à la gestion du temps dans une base de données de renseignements militaires (obtenue par photo-interprétation d'images satellitaires), puis elle s'est poursuivie par la réalisation d'une maquette conformément à l'analyse précédemment évoquée. A l'issue de la première phase, des recommandations pour la représentation de connaissances spatio-temporelles ainsi qu'une extension du schéma de données existant a été proposée, [CHEYLAN et al 95]. Les avantages attendus sont au nombre de trois : tout d'abord une facilité de mise à jour en réutilisant des photo-interprétations plus anciennes, une amélioration de la qualité par interprétation multi-dates et une analyse des dynamiques liées à chaque objet. Une maquette [GURUNLIAN et al 95] a donc été implantée sur O<sub>2</sub> et GéO<sub>2</sub> à l'aide du module de gestion de version de O<sub>2</sub>. Le développement d'une interface graphique, dans [PATTUS 95], a été effectué par le laboratoire COGIT.

## Conclusion

La poursuite de cette action concerne naturellement l'application de la notion de mutation dans un contexte plus large (propagation des mises à jour). Cependant, étant donné les difficultés rencontrées dans cette voie, une étude de l'existant est engagée et devrait permettre de préciser les méthodes de mutation et les outils concurrents ou complémentaires qui facilitent également la mise à jour (module d'appariement).

## Références

- [CHEYLAN et al 95] JP. Cheylan, L. Raynal, C. Mende & TS. Yeh : *Gestion du temps dans une base de données de renseignements militaires*, rapport n° 95/CEGN1/02, 1995.
- [GURUNLIAN et al 95] A. Gurunlian, JP. Cheylan & L. Raynal : *Réalisation d'une maquette de gestion de données spatio-temporelles pour la photo-interprétation*, rapport n° 95/CEGN2/03, 1995.
- [PATTUS 95] JPh. Pattus : *Conception et implémentation d'une interface utilisateur appliquée à la photo-interprétation*, rapport de stage DESS AIST, Université Pierre et Marie Curie, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950052/S-STA, septembre 1995.
- [SCHORTER 95] G. Schorter : *Le modèle historique de GéO<sub>2</sub>*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950020/S-RAP, 17 pages, 1995.

## C.3.2 Modélisation de la précision géométrique

par François Vauglin

### Contexte

Cette action de recherche est à replacer dans le contexte de la recherche sur la qualité des données qui s'est intensément développée au niveau international ces dernières années, voire décennies.

La production des informations géographiques caricature la localisation des objets du monde physique au détriment de certaines caractéristiques de forme et de position. De plus, toute chaîne de production contient certains petits défauts, souvent inévitables. L'ensemble a pour conséquence une certaine incertitude de positionnement qu'on cherche à modéliser.

L'approche adoptée doit permettre de connaître ou de modéliser l'évolution de la qualité après une mise à jour de données, (notes internes IGN, Services des Cartes Thématiques) ou plus généralement après une modification quelconque des données. Il s'agit aussi de modéliser des opérations diverses s'appuyant sur la géométrie comme des calculs d'intersections, des combinaisons, des superpositions de jeux de données, et ce afin de connaître l'impact de ces opérations sur la qualité des données.

Cette action de recherche coïncide avec la mise en place du projet "Qualité des bases de données" (Benôit David), et des travaux de contrôle qualité à la BDTopo (Gilles Leconte), à la BDCarto (Yves Bonin) et à Géoroute (Valérie Delbouve). En dehors de l'IGN, la collaboration la plus suivie concerne le PSIG (Programme de recherche sur les SIG) d'une part, et certains spécialistes reconnus (Nicholas Chrisman, Michael Goodchild).

### Objectifs

On distingue l'information ponctuelle de l'information linéaire, le cas surfacique n'étant pas abordé. Pour l'information ponctuelle, on cherche à établir un modèle paramétré et son mode d'emploi (la manipulation des paramètres). C'est le cas le plus simple. Certains aspects de l'information linéaire rendent la situation plus compliquée : outre les problèmes de précision ponctuelle que subissent les sommets des polygones, une autre source d'imprécision vient de la modélisation des objets géographiques en une suite de segments de droite. En effet, si cette modélisation convient pour les bâtiments, les lignes électriques, et la plupart des constructions humaines, elle est imparfaite pour la plupart des objets naturels. Les travaux de modélisation de l'erreur géométrique pour les objets linéaires doivent donc étudier ces deux composantes des erreurs avant de produire un modèle exploitable.

Les études menées jusqu'ici se sont efforcées de produire un modèle d'erreur en agrégeant les mesures d'écartés géométriques. Or on souhaite pouvoir renseigner les indicateurs de précision non plus sur un lot de données (par exemple : une feuille BDTopo) mais en cherchant à redescendre le plus près possible de l'objet. L'enjeu de cette connaissance est de pouvoir fournir aux utilisateurs des indicateurs directement exploitables au niveau de l'objet géographique. Cette démarche implique qu'on ne s'intéresse pas à des techniques de contrôle de qualité, mais à la détermination de 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.

### *Formalisation statistique*

Les mesures de distance entre points ne sont réalisées que sur un échantillon du jeu de données. L'objectif de notre étude est d'établir un modèle en définissant le comportement statistique de l'imprécision à partir de ces mesures : cela se fait actuellement par ajustement à une loi de répartition (type gaussienne).

### *Tests sur la BDTopo*

Quatre occurrences de la BDTopo sont disponibles au laboratoire COGIT. Différentes mesures de distances doivent être entreprises afin de préciser les lois de répartition (calculs de paramètres, tests d'ajustements). On étudiera également les variations suivant les classes d'objets. Des tests ont déjà été réalisés sur des comparaisons entre la BDTopo et la BDCarto.

## **Suites**

### *Tests BDTopo*

On prévoit d'étendre les tests à la comparaison entre la BDTopo et une saisie à plus grande échelle (1 : 15 000). Ceci doit permettre d'améliorer la maîtrise du contrôle qualité tout en constituant une base de référence permettant d'avoir des lots suffisamment conséquents pour faire les études statistiques nécessaires à la validation du modèle de localisation.

### *Modèle pour les objets linéaires*

De façon prospective, on peut esquisser des approches qui pourraient être développées par la suite : concernant les objets linéaires, on peut essayer d'adapter le type de modélisation en fonction du type d'objet traité. Ainsi, un essai a déjà été fait sur les objets naturels à tendance fractale (tel le réseau hydrographique) en les munissant d'un modèle obtenu par une technique de simulation. On peut développer la méthode et chercher à l'adapter à d'autres objets linéaires dont le type de forme est connu (exemple : clothoïde pour des tronçons de route).

Une autre piste est d'étudier dans quelle mesure on peut s'appuyer sur les seuils qui sont contenus dans les spécifications des bases de données de l'IGN pour ajuster le modèle d'imprécision (par exemple les cinquante mètres minimum des carrefours en patte d'oie dans la BDTopo).

### *Formalisation statistique de l'imprécision géométrique*

Des difficultés rencontrées lors de l'application de la méthode statistique à des données issues de Géoroute (et plus récemment de la BDCarto) soulèvent des problèmes de nature à remettre en cause certaines hypothèses statistiques élémentaires (à commencer par la définition des individus) et à reconsidérer la méthodologie statistique utilisée. Nous sommes donc confrontés à des questions de fond sur la théorie statistique.

### *Propagation du modèle*

L'étude de l'exploitation du modèle de localisation implique l'étude de l'utilisation des informations de précision. La première étape à franchir est celle du regroupement de deux points: quelles coordonnées affecter au nouveau point regroupé, et surtout quelles valeurs affecter aux paramètres de précision du point regroupé.

Une partie du problème a été étudiée : elle concerne la détermination des paramètres de précision dans le cas où l'on suppose que les points peuvent être regroupés. Cette étude reste à être approfondie et étendue au problème de la décision relative au regroupement.

Par la suite, on s'intéressera aux différents opérateurs des SIG : calculs de distances, d'aires, estimations de la précision des résultats etc ....

## **Publications**

[AMOUSSOU 95] Guy-Alain Amoussou : *Superposition et couches thématiques dans les bases de données géographiques*, stage de DEA Informatique, encadré par F. Vauglin, Paris-9 Dauphine, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950033/S-STA, septembre 1995.

[VAUGLIN 95a] François Vauglin : *Modeling Geometric Accuracy in GIS*, GISDATA'95 Specialist Meeting on Data Quality, Lisbonne (P), IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950019/S-COM, juillet 1995.

[VAUGLIN 95b] François Vauglin : *A Probabilistic Approach for the Use of Geometrical Metadata*, AGDM'95 (congrès annulé), Merrickville (Canada), IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950022/S-COM, octobre 1995.

[VAUGLIN 95c] François Vauglin : *Approche probabiliste pour des métadonnées sur la géométrie des objets géographiques*, Journées Recherche de CASSINI, Marseille (F), IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950030/S-COM, novembre 1995.

[VAUGLIN 95d] François Vauglin : *Probability Assessments for the Use of Geometrical Metadata*, article accepté à GISDATA'96 Summer Institute, Berlin (D), IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950032/S-COM, juillet 1995.



## Références

[ABBAS 94] Iyad Abbas : *Base de données vectorielles et erreur cartographique : problèmes posés par le contrôle ponctuel; une méthode alternative fondée sur la distance de Hausdorff : le contrôle linéaire*, thèse de doctorat de l'Université Paris-7 et Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Spécialité Sciences de l'information géographique, soutenue le 10 juin 1994, IGN, Service de la Recherche, SR 940008/R-THE, 1994.

[MERKITOS 94] in *Marine geodesy*, volume 171, n° 4, 1994.

[PULLAR 91] M. Pullar : *Spatial overlay with inexact numerical data*, AutoCarto 10, in technical paper 1991 ACSM ASPR, Annual Convention, volume 6, 1991.

## C.3.3 Algorithmes de généralisation

par Emmanuel Fritsch

### Contexte

La généralisation cartographique est le processus qui permet d'obtenir à partir d'une carte ou d'une base de données à grande échelle une sortie graphique d'échelle plus petite. L'automatisation de ce processus est donc un objectif important dans le cadre de la rédaction automatique des cartes. Or de nombreux aspects de la généralisation sont encore inexplorés. En particulier, dans le cadre de la généralisation du linéaire, s'il existe de nombreux algorithmes de lissage et de filtrage, il en est peu qui effectuent des caricatures et des suppressions de détails, et aucun qui gère les déplacements.

### Objectif

Cette action de recherche s'est attachée à la généralisation du linéaire - constituant principal de l'information géographique - et plus spécialement du linéaire routier.

Les travaux se sont développés suivant trois axes : développement de nouveaux algorithmes et de nouvelles représentations, en particulier pour traiter les problèmes de caricature, amélioration de la plate-forme de généralisation PLAGE développée au laboratoire COGIT, et implémentations et tests de mesures pour valider les opérations de généralisation.

### Activités et résultats

Pour traiter les problèmes de caricature de virages, les travaux entamés en 1994 sur l'algorithme de Lowe ont été poursuivis. Initialement, cet algorithme permettait d'augmenter la flèche des virages en épingle à cheveux. Les améliorations apportées permettent de résoudre les problèmes d'empâtement par augmentation de la distance entre les points d'inflexions.

Le travail sur une approche fréquentielle de la généralisation du linéaire, initié en 1994, a été poursuivi. Le principe est de modéliser d'abord la polyligne par une représentation fréquentielle sur les courbures de la ligne [FRITSCH 95], puis de travailler sur ces fréquences pour réaliser des opérations de généralisation au moyen de filtre (par exemple filtre passe bas pour l'élimination des détails les plus petits). Un premier essai sur les séries de Fourier avait montré l'intérêt de cette méthode pour la caricature des virages et l'élimination des petits détails, mais elle présentait des défauts dus à une perte de précision spatiale et à des effets de résonance. Un deuxième essai portant sur des décompositions en base d'ondelette a permis de supprimer une partie de ces défauts, mais la précision absolue n'est toujours pas assurée. Cette limite a conduit à établir un modèle mécanique simple permettant d'assurer la précision géométrique au moyen de forces de rappel. Présentant certains avantages, le modèle doit être affiné en 1996 pour annuler l'apparition de points anguleux dans les virages. Par ailleurs, l'analyse fréquentielle devrait contribuer à la caractérisation des éléments linéaires.

Pour la plate-forme PLAGE, des progrès notoires ont été faits dans la facilité d'intégration de nouveaux modules dans l'interface. Grâce à la modularité chaque utilisateur peut ajouter à la version référence de la plate-forme ses propres modules spécifiques dans un laps de temps très restreint (moins d'une demi-journée). Ainsi, le travail de caractérisation des lignes et la découpe en portions homogènes, entrepris dans l'action de recherche de modélisation a été grandement facilité par cette version de l'interface. La plate-forme fournit aussi la possibilité de comparer visuellement deux graphes : le graphe en cours de généralisation, d'une part, et le graphe initial ou un graphe de référence, d'autre part. En complément à ce travail a été écrite et fournie à chaque utilisateur une documentation de la plate-forme. Enfin, divers algorithmes ont été ajoutés, en particulier celui de Lang qui semble intéressant en terme de filtrage.

## Conclusion

La poursuite de ces trois axes, complétée des travaux sur la modélisation de l'information géographique pour la généralisation (voir chapitre C.3.4) devrait permettre de progresser vers une plus grande automatisation de la généralisation du linéaire.

## Publications

[COGIT 95] Collectif laboratoire COGIT : *Minutes du séjour du Professeur RB. McMaster, du 22 novembre au 15 décembre 1994*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950004/S-CRD, 1995.

[FRITSCH, LAGRANGE 95] E. Fritsch & JPh. Lagrange : *Spectral representations of linear features for generalization*, COSIT'95, Vienne (A), IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950037/S-COM, septembre 1995.

[LECORDIX 95] F. Lecordix : *Guide de programmation dans la plate-forme ADA de généralisation*, rapport technique interne, IGN Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950051/S-RAP, 1995.

[MUSTIÈRE 95] S. Mustière : *Mesure de la qualité de la généralisation du linéaire*, rapport de stage du DESS cartographie, Université Paris-1/ENSG, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950044/S-STA, septembre 1995

[PLAZANET et al 95] C. Plazanet, J.G. Affholder & E. Fritsch : *The Importance of geometric modeling in linear feature generalization*, Cartography and GIS, à paraître, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, article de journal, SR 950038/S-ART, 1995.

[RUAS 95] A. Ruas : *Formalismes pour l'automatisation de la généralisation : métrique, topologique, partitionnement*. Recherche, laboratoire COGIT, SR 950015/S-COM, 1995.

## C.3.4 Problèmes de modélisation liés à la généralisation

par Emmanuel Fritsch

### Contexte

Les études menées en généralisation ont montré la difficulté à prendre en compte certaines règles de cartographie, soit que la règle soit peu parlante, soit que les entités sur lesquelles elle s'applique ne soient pas des objets directement accessibles. Ainsi l'information présente dans une base de données n'est elle pas toujours sous une forme autorisant une automatisation simple du processus de généralisation.

### Objectif

Cette action de recherche s'est donc attachée à modéliser l'information géographique en vue de permettre une meilleure généralisation cartographique. Pour cela il fallait dégager des outils de caractérisation des propriétés à étudier.

En effet, la caractérisation est une étape nécessaire dans l'acquisition des connaissances puisqu'elle engendre ensuite le choix des bonnes transformations : pour chaque type de données, les formes doivent être distinguées automatiquement puis classées. Ainsi, les routes seront caractérisées par leur forme globale et/ou locale selon leur sinuosité.

Par modélisation, on entend alors la représentation sous forme d'un modèle de données de cette information de telle sorte qu'il soit ensuite possible de l'utiliser pendant la phase de généralisation proprement dite.

Cette action de recherche s'est attachée, comme la précédente et pour les mêmes raisons, à l'étude du linéaire.

### Activités et résultats

Les travaux ont porté sur plusieurs directions complémentaires, à savoir l'algorithmie et l'intégration des nouveaux développements sur les plates-formes de généralisation adéquates (ADA, baptisée PLAGÉ et SMECI, nommée Stratège) à la prise en compte de l'aspect contextuel de la généralisation.

En ce qui concerne la recherche sur la caractérisation du linéaire routier en vue de sa généralisation, on utilise la répartition des points d'inflexion pour segmenter la ligne ainsi que des mesures (longueur, hauteur, surface) entre ces points pour classer les segments en fonction de leur sinuosité. Cette recherche donne des résultats satisfaisants sauf pour les formes complexes de virage, lesquelles demandent une représentation plus détaillée. La recherche en cours vise à utiliser différents niveaux de points caractéristiques (points d'inflexion et sommets) et leur répartition pour qualifier ces formes complexes.

Dans le cadre de la généralisation du linéaire, l'analyse des défauts des algorithmes existants met en cause l'efficacité de la représentation par polygones. Il a donc semblé utile de développer des représentations alternatives pour construire des algorithmes plus performants. C'est ainsi qu'ont été développées des représentations fréquentielles et des algorithmes associés, lesquels offrent d'intéressantes possibilités de caricature, bien que certains défauts soient encore à traiter.

En ce qui concerne les mesures de validation des opérations de généralisation, une trentaine de mesures ont été programmées. Elles proviennent soit existant de la littérature (taux de compression, mesures de McMaster, de Jasinsky, distance de Hausdorff...), soit de propositions originales (notamment dans le cadre de la détection des conflits dus à la symbolisation). Après expérience, seule une dizaine de mesures ont été retenues et appliquées sur des courbes, soit généralisées manuellement, soit filtrées avec Douglas & Peucker, soit lissées avec un filtre Gaussien. Les études sur les mesures doivent se poursuivre en 1996 aussi bien pour la caractérisation des lignes avant application d'opérateur de généralisation que pour la validation de la généralisation.

## Conclusion

Ces recherches ont permis de formaliser les méthodes de description des éléments caractéristiques des objets à généraliser.

Afin de renforcer la collaboration entre les laboratoires COGIT et l'université du Minnesota (USA), Corinne Plazanet et Anne Ruas ont rencontré le Professeur McMaster à Minneapolis et visité le département de géographie. La visite du Professeur Weibel au laboratoire COGIT puis celle de Corinne Plazanet à Zurich (CH) ont permis de progresser dans nos échanges avec l'université de Zurich.

## Publications

[COGIT 95] Collectif laboratoire COGIT : *Minutes du séjour du Professeur RB. McMaster, du 22 novembre au 15 décembre 1994*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950004/S-CRD, 1995.

[FRITSCH, LAGRANGE 95] E. Fritsch & JPh. Lagrange : *Spectral representations of linear features for generalization*, IGN Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 95-0037/S-COM, 1995.

[PLAZANET 95a] C. Plazanet : *Measurements, characterization and classification for automated line feature generalization*. Publié dans Autocarto, Charlotte, Caroline du Nord (USA), 27 février-1 mars 1995, volume 4, pp. 59-68, IGN Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950001/S-COM, 1995.

[PLAZANET 95b] C. Plazanet : *Geometry modeling for linear feature generalization*. ESF/NSF Summer Institute, Freeport, Maine (USA), août 1995, volume 4, pp. 59-68, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950039/S-COM, 1995.

[PLAZANET 95c] C. Plazanet : *Modélisation de la géométrie des objets linéaires en vue de leur généralisation automatique*. Publié dans ICC'95, Barcelone (E), 3-9 septembre 1995, pp. 486-495. IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950040/S-COM, 1995.

[PLAZANET et al 95] C. Plazanet, JG. Affholder & E. Fritsch : *The Importance of geometric modeling in linear feature generalization*. Cartography and GIS, à paraître en 1996, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, article de journal, SR 950038/S-ART, 1995.

[RUAS 95a] A. Ruas : *Multiple paradigms for automating map generalization : Geometry, topology, hierarchical partitioning and local triangulation*, publié dans Autocarto, Charlotte, Caroline du Nord (USA), 27 février-1 mars 1995, volume 4, pp. 69-78. IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950006/S-COM, 1995.

[RUAS 95b] A. Ruas : *Formalismes pour l'automatisation de la généralisation : métrique, topologie, partitionnement hiérarchique et triangulation locale*, ICC'95, Barcelone (E), 3-9 septembre 1995, pp. 950-959. IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950015/S-COM, 1995.

## C.3.5 Généralisation automatique : approche à base de connaissances

par Nicolas Regnaud

### Contexte et objectifs

Le seul logiciel de généralisation actuellement sur le marché, MGE/MG d'Intergraph, est complètement interactif et ne propose ni aide pour le choix des opérations ou algorithmes à appliquer, ni contrôle de la validité du résultat. Le but des recherches en généralisation est d'aboutir à un système global, construit à partir d'une boîte à outils, qui automatise le plus possible le processus de généralisation.

Cette action de recherche a pour but d'étudier l'automatisation des tâches de "haut niveau" qui se prêtent bien à une approche à base de connaissances. On étudiera en particulier celles pour lesquelles la prise en compte du contexte est primordiale, c'est-à-dire celles qui s'appliquent à un ensemble d'objets et s'appuient sur les relations existantes entre eux. Trois aspects de la généralisation contextuelle sont étudiés :

- la sélection des objets, en particulier la sélection du réseau routier pertinent en milieu urbain,
- la gestion des conflits, permettant de détecter et résoudre les situations locales ne répondant pas aux spécifications métriques en utilisant des opérations de déformation et de déplacement,
- l'agrégation de bâtiments, devant permettre de résoudre les cas de conflit dans des zones trop denses pour appliquer une méthode de résolution basée exclusivement sur des déplacements.

### Travaux effectués

Le premier travail a consisté à développer sous un environnement objet les fonctions de base de la plate-forme *Stratege*. (création/visualisation de données, structuration et maintien des relations topologiques entre objets, création d'une couche d'information géographique reliée avec la couche métrique/topologique...).

Des outils dédiés à la généralisation ont ensuite été développés :

- calcul de distances (euclidienne et Hausdorff), d'intersection, de surfaces, d'enveloppe convexe, de centre de gravité, de triangulation locale de Delaunay,
- implémentation d'opérateurs de généralisation : déplacement, filtrage, lissage et d'une interface de choix d'algorithme, de valeur paramétrique et de validation,
- développement de deux algorithmes d'agrégation.

En parallèle avec ces développements, une réflexion sur l'information nécessaire à la généralisation a incité à faire évoluer la modélisation initiale par l'ajout de cinq couches d'information :

- les objets de référence, permettant de contrôler la déformation locale des objets par rapport à leur position initiale,
- les partitions, qui permettent de partitionner l'espace de façon hiérarchique,
- les triangulations locales de Delaunay, qui permettent de modéliser localement les relations de proximité entre objets,
- les structures, qui sont des répartitions caractéristiques d'objets de même nature,
- les structures géométriques, qui permettent d'assembler des éléments linéaires en fonction de leurs caractéristiques géométriques.

### Conclusion

Une fois ces outils au point, il faut étudier un système, qui à partir de l'analyse de chaque situation locale, permette de choisir la stratégie à adopter. Suivant les cas, on connaîtra l'enchaînement des tâches à effectuer, ou on devra essayer plusieurs solutions en parallèle et évaluer les résultats pour choisir le meilleur.

Le but est de construire un système générique qui puisse prendre en compte le type de généralisation qu'on souhaite obtenir : favoriser le nombre d'objets, ce qui nécessite des déformations, favoriser la précision du positionnement, ce qui nécessite plutôt des agrégations.



## Publications

- [HANGOUËT 95a] JF. Hangouët : *Computation of the Hausdorff distance between plane vector polylines*, AutoCarto 12, Charlotte, Caroline du Nord (USA), in actes pp. 1-10, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950002/S-COM, février 1995.
- [HANGOUËT 95b] JF. Hangouët : *Structures pour la généralisation*, rapport technique, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950024/S-RAP, 1995.
- [HANGOUËT 95c] JF. Hangouët : *Interactions bâti-routier*, rapport technique, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950053/S-RAP, 1995.
- [REGNAULD 95a] N. Regnault : *Opérateurs d'agrégation : Etat de l'art.*, rapport technique, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950035/S-RAP, 1995.
- [REGNAULD 95b] N. Regnault : *Agrégation de bâtiments par prolongation d'arêtes existantes*, Journées Cassini, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950036/S-COM, 20 septembre 1995.
- [RUAS 95a] A. Ruas : *Multiple paradigms for automating map generalization : geometry, topology, hierarchical partitioning and local triangulation*, AutoCarto 12, Charlotte, Caroline du Nord (USA), in actes pp. 69-78, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950006/S-COM, février 1995.
- [RUAS 95b] A. Ruas : *Formalismes pour l'automatisation de la généralisation : métrique, topologie, partitionnement hiérarchique et triangulation locale*, ACI'95, Barcelone (E), in actes pp. 950-959, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, 10 pages, SR 950012/S-COM, février 1995.
- [RUAS 95c] A. Ruas : *Cours sur la généralisation*, Université d'été des pays scandinaves, rapport technique, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950054S/CNF, 1995.
- [RUAS & al 95] A. Ruas, JF. Hangouët et N. Regnault : *Notice sur les développements sous ILOG Version 2*, rapport technique, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950055/S-RAP, 1995.

## C.3.6 Vers une généralisation automatique du relief

par Pascale Monier

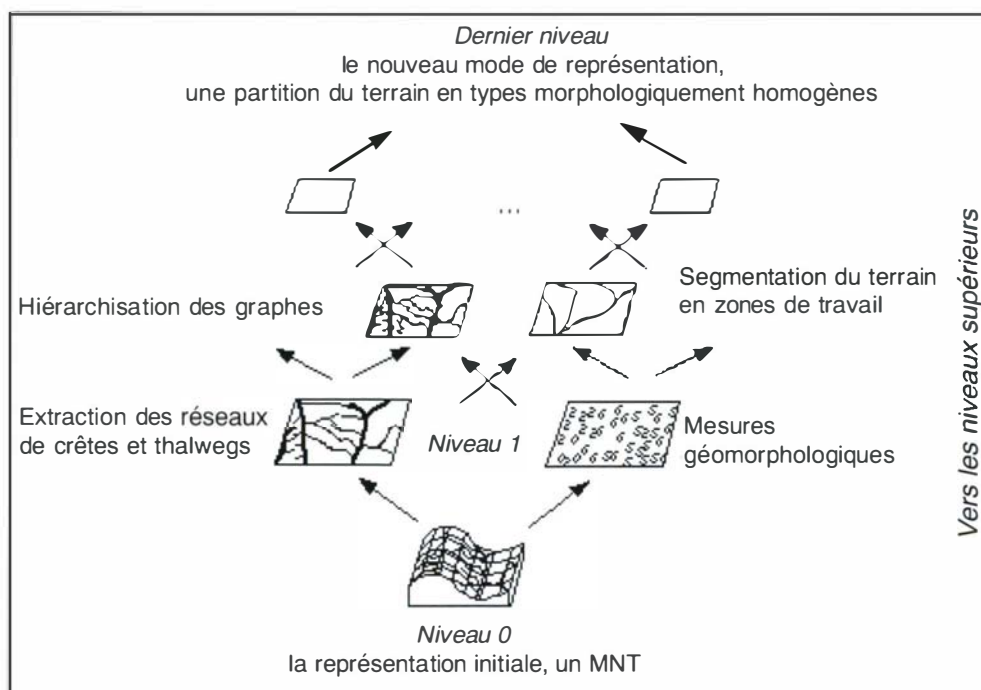
### Introduction

Les études menées en modélisation ont mis en évidence l'importance de l'aspect caractérisation, aussi bien pour le linéaire que pour le surfacique.

Par modélisation, on entend la représentation sous forme d'un modèle de données plus adapté à la généralisation de cette information. Ainsi le Modèle Numérique de Terrain (MNT) initial est enrichi par acquisition et formalisation de l'information, ceci devant aboutir à une description hiérarchique des caractéristiques du relief, localisées sur le terrain.

### Contexte

En effet, la caractérisation est une étape nécessaire puisqu'elle engendre ensuite le choix des bonnes transformations : pour chaque type de données, les formes doivent être distinguées automatiquement puis classées. Ainsi, les routes seront caractérisées par leur forme globale et/ou locale selon leur sinuosité et les types de terrain seront caractérisés par les lignes structurelles qui les composent, notamment par les réseaux de crêtes et thalwegs.



**figure C.3.6.1** : représentation des niveaux de connaissance

## Activités

Les travaux en matière de généralisation du relief ont porté sur deux directions complémentaires, à savoir l'algorithmie et l'intégration des nouveaux développements sur la plate-forme de généralisation du relief créée durant l'été 1995 et développée en fortran.

Ce qu'on peut noter d'emblée, c'est que ces recherches ont conduit à systématiser une approche visant à rechercher des méthodes et des techniques d'analyse des objets selon leur nature et leur forme.

## Résultats

Les travaux réalisés sur l'étude des pentes pour segmenter le terrain en zones homogènes donnent des résultats satisfaisants mais demandent encore un affinage. En parallèle, un outil de lissage a été implémenté qui convient pour des terrains accidentés de type cévenol. Les efforts actuels concernent l'intégration des algorithmes existants sur la nouvelle plate-forme.

## Conclusion

Bien que le schéma conceptuel de modélisation du relief se rapproche de celui du linéaire, des problèmes apparaissent spécifiques au 3-D et particulièrement à la superposition des couches raster (MNT, carte des pentes) et vecteur (graphe des crêtes et thalwegs, réseau hydrographique).

## Publications

[BEAUCE 95] Vincent Beauce : *Réalisation d'une plate-forme pour la généralisation du relief*, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, rapport de stage, SR 95-0045/S-STA, septembre 1995.

[MONIER 95a] Pascale Monier : *Représentation et caractérisation de l'information pour une généralisation du relief*, publié dans ICC'95, Barcelone (E), 3-9 septembre 1995, pp. 480-485, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950017/S-COM, 1995.

[MONIER 95b] Pascale Monier : *Prise en compte de l'orographie dans la généralisation automatique*, IGN Service de la Recherche, laboratoire COGIT, rapport, SR 950021/S-RAP, juin 1995.

[MONIER 95c] Pascale Monier : *Knowledge formalization for automated relief generalization*, publié dans Workshop on Progress in Automated Map Generalization, Barcelone (E), 1-3 septembre 1995. IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950041/S-COM, 1995.

[MONIER 95d] Pascale Monier : *A heuristic approach to automated generalization of relief in Gis modeling*, accepté, non publié dans ACM-GIS'95, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950042/S-COM, juin 1995.

## C.3.7 Placement automatique des écritures sur une carte

par François Lecordix

### Contexte - objectifs

Faute de solution automatique satisfaisante sur le marché des logiciels de cartographie, le laboratoire COGIT a entrepris depuis trois ans des recherches sur le placement automatique des écritures avec une qualité cartographique afin d'exploiter au mieux les bases de données IGN pour la rédaction des cartes (à titre indicatif, plus d'une centaine d'heures sont nécessaires pour réaliser interactivement une feuille au 1 : 25 000). Entreprises sous forme algorithmique, ces recherches se sont attachées à résoudre deux problèmes :

- prise en compte du fond de carte pour avoir un placement de bonne qualité cartographique,
- gestion de volume de données important pour pouvoir traiter une carte complète.

De façon schématique, la démarche retenue consiste pour chaque écriture à déterminer un ensemble fini de positions possibles, à quantifier leur qualité en fonction des critères cartographiques et à retenir la meilleure position en tenant compte des contraintes de non recouvrement imposées par les autres écritures. Dans les années précédentes, les écritures horizontales, les numéros de route [BARRAULT 95a] et [BARRAULT 95b] et les kilométrages ont été traités avec un taux de bon placement voisin de 90%.

### Activités - résultats

En 1995, le travail s'est principalement concentré sur les noms à disposition du linéaire de grande dimension comme les noms de rivière. La première difficulté réside dans la détermination de positions possibles pour l'écriture en respectant les règles cartographiques (le nom doit longer la courbe, éviter les courbures extrêmes ou complexes, négliger les irrégularités de faible amplitude des lignes...). Une première approche a consisté à transformer la courbe initiale de l'objet à nommer (la rivière) pour obtenir une nouvelle courbe support du nom; mais des essais par lissage ou par morphologie mathématique n'ont pas donné les résultats escomptés. Une deuxième approche a consisté à détecter les portions de courbes susceptibles de porter un mot de l'écriture, c'est-à-dire celles dont la courbure est inférieure à une valeur maximale. Cette approche a nécessité un travail important sur l'estimation de la courbure de courbes discrètes mais semble donner des résultats satisfaisants. L'étape suivante consistera à déterminer les positions possibles pour une écriture en respectant un espace inter-mots constant visuellement, puis à quantifier la qualité des différentes solutions possibles en réutilisant les techniques employées pour les toponymes horizontaux et les numéros de route. Ces tâches seront reprises à la fin de l'année 1996.

Des recherches ont également été menées sur le placement automatique des noms de rue sur un plan de ville [DJELLOUL 95]. Cette étude a permis d'aborder les problèmes d'espacement inter-mots d'une écriture. Pour obtenir des résultats plus probants qu'actuellement, le travail doit se poursuivre au début de l'année 1996.

En complément de ces activités purement recherche, des interventions ont été menées pour valider ces recherches auprès des services de l'IGN : expérimentation au projet industrialisation des sorties au 1 : 25 000 pour la première carte issue de la BDTopo (carte d'Amplepuis), aide à la production de la nouvelle carte routière au 1 : 1 000 000 (toponymes + numéros de route + kilométrages) [LECORDIX 95]. Ces interventions ont permis d'utiliser aussi la première version industrielle du logiciel de placement des écritures horizontales, développée dans l'environnement du logiciel de rédaction Mercator de Barco Graphics.

### Suites

D'une part, les recherches vont se poursuivre pour différents types d'écritures : les noms de rue, les cotes de courbes de niveau, les noms hydrographiques à disposition linéaire. D'autre part, le lien avec un industriel et l'utilisation en production du logiciel de placement des écritures horizontales ayant mis en évidence certaines limitations du logiciel, des études vont être menées pour prendre en compte la projection pour les écritures "horizontales" et pour étudier les causes des 10% de mauvais positionnement. De plus dans le cadre de la réalisation de la Top100 (carte au 1 : 100 000 à partir de la BDCarto), ces recherches pourront à nouveau être mises en application. Enfin, la collaboration avec la société Barco Graphics devrait se poursuivre avec le portage de nouveaux modules dans l'environnement Mercator, comme celui des numéros de route.

## Conclusion

Ces recherches sur le placement automatique des écritures commencent donc à fournir en production des modules spécifiques aux différents types d'écritures, permettant d'exploiter aux mieux les bases de données IGN pour la rédaction de carte. A terme, ces travaux devront s'orienter vers un système fournissant une solution globale pour l'ensemble des écritures et prenant en compte aussi les notions de mise à jour des cartes (et donc des écritures) à partir des mises à jour des bases de données.

## Publications

[BARRAULT, LECORDIX 95a] M. Barrault & F. Lecordix : *An automated system for linear feature name placement wich complies with cartographic quality criteria*, in Actes du congrès AutoCarto12, volume 4, pp. 321-330, Charlotte (USA), février-mars 1995, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950012/S-COM, 1995.

[BARRAULT 95b] M. Barrault : *Une méthode de placement automatique des écritures des objets linéaires avec une qualité cartographique*, in Actes du congrès de l'Association de Cartographie Internationale, 17ème édition, volume 1, pp. 497-506, Barcelone (E), septembre 1995, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950018/S-COM, 1995.

[DJELLOUL 95] M. Djelloul : *Placement automatique des noms de rues*, rapport de stage de DESS d'Orsay, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950046/S-STA, septembre 1995.

[LECORDIX 95] F. Lecordix : *Placement automatique des écritures sur la carte routière de France à partir de la BD Million*, in Actes du congrès de l'Association de Cartographie Internationale, 17ème édition, volume 1, pp. 960-964, Barcelone (E), septembre 1995, IGN, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, SR 950016/S-COM, 1995.



## Introduction

*par Claude Boucher*

L'Institut Géographique National, depuis sa création en 1940, en continuité du Service Géographique de l'Armée, a parmi ses missions celle de réaliser les infrastructures géodésiques de base du territoire national, ainsi que de maintenir et actualiser les compétences techniques associées, au moyen de la formation et de la recherche.

La recherche fut ainsi initialement menée pour le développement puis l'amélioration de processus adéquats pour réaliser ces infrastructures : réseaux géodésiques nationaux, réseaux de nivellement de précision, canevas astronomiques. Une large part était consacrée à la maîtrise des mesures de terrain, voire à des développements instrumentaux.

Dans les années 1960, deux axes de changement apparurent et modifièrent progressivement mais en profondeur ces activités de recherche.

Des techniques nouvelles apparaissaient (électronique, informatique et technologies spatiales) et apportaient en Géodésie des instruments de mesure plus performants en précision, portabilité et coût, des ordinateurs et méthodes informatiques faisant rapidement exploser les possibilités anciennes de calcul scientifique, d'archivage et de diffusion des informations (données ou résultats) et enfin des systèmes de mesures satellitaires qui bouleversaient rapidement les méthodes traditionnelles d'établissement des canevas géodésiques par leur précision et leur globalité.

Des impératifs nouveaux de production définis par l'IGN afin de développer ses ressources propres furent axés sur une possibilité d'offrir des services et de réaliser des travaux sur contrats en France ou à l'exportation. Deux axes virent le jour dans le domaine géodésique : réalisation de grandes infrastructures dans des pays en voie de développement, et applications au génie civil des techniques géodésiques (métrologie géodésique).

Le résultat fut que les relativement modestes ressources de recherche furent essentiellement consacrées au développement de nouveaux processus (nivellement motorisé ou utilisation opérationnelle de GPS) et produits (le nouveau Réseau Géodésique Français). Certains développements furent menés à bien dans le cadre de projets qui s'efforcèrent de fédérer les ressources (Projet GPS).

Néanmoins, l'expertise progressivement accumulée en Géodésie Spatiale et une forte implication de certains ingénieurs dans un tissu de relations scientifiques extérieures, aussi bien nationales (GRGS, INSU...), européennes (RETRIG puis EUREF...) qu'internationales (Association Internationale de Géodésie, IERS...) ont permis de développer des travaux de recherche relevant d'une Géodésie plus fondamentale et globale, continuant ainsi une tradition française reconnue, en France ou à l'étranger.

L'IGN, en améliorant sensiblement le cadre de développement de la recherche grâce à la création de laboratoires bien identifiés, d'un Schéma Directeur et de programmes, ainsi qu'un Comité Scientifique et Technique, a permis le développement de ces axes de recherche plutôt généraux ou orientés vers des intérêts externes, notamment en Géophysique ou en Océanographie.

Ce document présente donc d'une manière résumée les thèmes actuels de recherche du Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG) de l'IGN. Il fut créé en 1991 au sein du Service de Géodésie et Nivellement puis rattaché en 1992 à la Direction Technique de l'IGN. Depuis le 1er janvier 1995, il est rattaché à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) dans le cadre du développement d'un pôle recherche. Ces thèmes sont en accord avec le Schéma Directeur de la Recherche de l'IGN.

La présentation choisie suit une logique taxonomique qui ne reflète pas nécessairement un ordre de priorités. Il est donc important de souligner les deux axes prioritaires en 1996 :

- a) amélioration de la réalisation de systèmes terrestres combinés (en particulier le développement du logiciel GEOMIX),
- b) effort continu d'amélioration des traitements dynamiques des données DORIS.

Ils ont tous deux un impact direct sur notre contribution au Service International de la Rotation de la Terre (IERS).

## **Systemes de référence**

Cette activité consiste à exploiter des données diverses (principalement positions issues de Géodésie Spatiale) pour réaliser des systèmes de références terrestres géocentriques. Ceci est actuellement réalisé avec le logiciel SSCMIX et devrait rapidement utiliser le nouveau logiciel GEOMIX. Les données VLBI, laser, GPS et DORIS sont utilisées.

La principale application est la réalisation du système terrestre de l'IERS (ITRS) dont le processus doit évoluer afin de tirer un maximum des techniques désormais disponibles et en particulier des données que les divers centres d'analyse pourraient nous fournir.

D'autres applications sont également programmées ou envisagées :

- évaluation de DORIS pour le compte du centre de coordination,
- réalisation du système géodésique européen ETRS, système officiel défini par la sous-commission EUREF de l'Association Internationale de Géodésie (AIG), et en particulier le RRF, partie française de EUREF,
- projet d'un réseau de référence pour l'Afrique (AFREF),
- projet d'un réseau global pour densifier l'ITRF (WOREF), exploitant l'ensemble des données archivées à l'IGN.

## **Références verticales**

La comparaison et la combinaison des diverses données liées aux références verticales (niveau des mers, géoïde, nivellement, géodésie spatiale) a pour but d'obtenir une référence verticale globale de la meilleure qualité possible (avec en particulier la détection et la suppression des erreurs systématiques) et cohérente avec les références tridimensionnelles géocentriques étudiées par ailleurs.

Deux axes de recherche sont actuellement en cours au laboratoire LAREG :

### *Surveillance du niveau des mers*

Le programme consiste en l'étude des données disponibles sur le niveau des mers (essentiellement marégraphie et altimétrie radar par satellite) et la détermination du niveau des mers avec son spectre spatio-temporel. L'accent est mis sur le niveau moyen considéré comme surface de référence et sa comparaison avec les références géodésiques (ellipsoïde et géoïde).

### *Détermination de modèles de géoïde*

L'utilisation de modèles de géoïde rentre pleinement dans le cadre de ce thème. L'étude de leur détermination est donc un élément de ce programme dans la mesure notamment où il permet d'en connaître mieux la qualité.

## **Traitements dynamiques de géodésie spatiale**

Cette activité vise à développer une compétence approfondie dans les traitements dynamiques de données de géodésie spatiale. Elle constitue une priorité majeure :

- parce que la Géodésie Spatiale prend une place prépondérante en Géodésie et bien au-delà (navigation, génie civil...),
- parce que les limitations actuelles de ses performances déjà impressionnantes résident dans l'analyse des données plus que dans la qualité des mesures instrumentales brutes (en classant les phénomènes de propagation hors de ce bilan instrumental).

Cette activité se concentre à court terme sur GPS et DORIS. A plus long terme, d'autres techniques pourraient être envisagées, y compris des techniques nouvelles telles que le système allemand PRARE.

Elle a une synergie forte avec le thème précédent :

- mieux comprendre les analyses des données de Géodésie Spatiale effectuées par divers centres dans le monde pour contribuer à l'IERS,
- permettre de réaliser des traitements de haute qualité de campagnes de mesure GPS ou DORIS ayant un intérêt pour les Systèmes de Référence :

- campagnes régionales GPS
- colocations GPS/DORIS
- rattachements de marégraphes ....

On peut sans doute regretter de n'avoir pas investi plus tôt et plus lourdement dans le développement d'un logiciel, ceci pour diverses raisons. Nous avons donc choisi une voie de coopération forte avec des équipes qui ont fait ce choix avec succès et non d'une simple utilisation «opérationnelle». Nous avons néanmoins réussi à amorcer ce mouvement qu'il faut maintenant stabiliser et valoriser.

Le programme est donc constitué de deux axes :

#### *Traitements DORIS*

Le programme consiste à étudier le traitement des données DORIS afin d'en obtenir les meilleurs résultats possibles. Il s'appuie sur le logiciel GIPSY/OASIS du Jet Propulsion Laboratory (JPL) modifié pour traiter les données DORIS. Cette activité se décompose plus particulièrement en trois axes :

- analyse des données avec GIPSY/OASIS. Cette activité se fait en particulier comme Centre d'analyse DORIS pour l'IERS,
- coordination DORIS pour l'IERS, avec comme résultat une stimulation des recherches en ce domaine grâce à une certaine compétition par rapport aux autres centres d'analyse DORIS et une contribution à l'IERS mieux maîtrisée,
- recherches diverses pour l'amélioration du traitement (en particulier, calculs multi-satellites, correction troposphérique...).

#### *Traitements GPS*

La stratégie choisie consiste à devenir centre d'analyse régional de l'IGS et centre satellite du centre de calcul GPS de l'Université de Berne, ce qui signifie que nous soutenons le développement du logiciel Bernese Software de l'Université de Berne, notamment en réalisant certaines recherches particulières.

Nous soutenons également son utilisation dans le cadre du consortium européen CODE, qui est centre d'analyse global de l'IGS et qui est en train d'organiser des services spécifiques pour l'Europe en sus de la garantie de pérennité et de redondance qu'offre la participation de CODE à l'IGS : traitement de stations supplémentaires en Europe pour EUREF, en particulier stratégie de traitement de stations permanentes ....

Nous bénéficions ainsi de l'usage du Bernese au laboratoire LAREG, avec toutes les mises à jour dans un cadre coopératif où nous effectuons des traitements relatifs à nos objectifs scientifiques propres.

La contribution du laboratoire LAREG au Service IGS est donc significative et variée :

- interface IERS/IGS sur l'ITRF,
- participation à CODE,
- centre de données global (voir ci-dessous),
- suivi géodésique des stations françaises du réseau IGS, actuellement quatre récepteurs CNES.

Par ailleurs, l'application de GPS à des réseaux régionaux de surveillance géophysique est abordée actuellement sur deux zones :

- Pacifique sud-ouest vers la Nouvelle Calédonie, en coopération avec l'ORSTOM,
- Antarctique, en coopération avec l'Ecole Normale Supérieure.

## **Conclusions**

Un effort particulier de publication de résultats (création de séries de publications propres au laboratoire LAREG) ainsi que de développement d'un Système d'Information et de Traitement a été entrepris pour soutenir les activités de recherche et de service.

Ce système utilise les possibilités d'Internet et est accessible par ftp et http. Il comprend outre des données alphanumériques des informations graphiques (cartes de réseaux et visualisations de résultats) et des fiches de stations interrogeables par SQL.

La création d'un Centre serveur d'Informations Astronomiques et Géodésiques (CIAG) a permis de regrouper l'ensemble des services proposés dans le cadre des diverses coopérations :

- centre de données pour l'IERS,
- centre de données global de l'IGS déjà opérationnel depuis deux ans,
- centre de données pour DORIS dans le cadre du centre de coordination pour l'IERS, en coopération avec le CNES et le CDDIS de la NASA,
- centre d'information pour des initiatives soutenues par l'Association Internationale de Géodésie. En particulier, dans le cadre de la Commission X (Réseaux géodésiques globaux et régionaux), un catalogue des systèmes géodésiques, ellipsoïdes, projections, systèmes d'altitude est programmé,
- centre de données pour la commission européenne EUREF,
- centre de données national pour le niveau des mers avec le SHOM, le BRGM et le Ministère de l'Environnement (SONEL).

Le Laboratoire LAREG doit être le détenteur d'un savoir et savoir-faire scientifique et technique reflétant la contribution traditionnelle de l'IGN en Géodésie. Il doit mener cette mission dans un cadre coopératif fort, que ce soit sur un plan national, européen ou international. Il doit enfin surtout savoir orienter son activité en fonction de l'actualité des besoins scientifiques ou techniques. C'est justement en s'intéressant activement aux nouvelles applications en Géophysique, en Océanographie, en Navigation ou en Systèmes d'Information Géographique, que cette tradition géodésique sera la mieux assurée et comprise.

## C.4.1 Systèmes de référence

par Claude Boucher, Zuheir Altamimi, Loïc Daniel, Loïc Duhem, Hervé Fagard et Patrick Sillard

### Introduction

Un volume important des activités de recherche du laboratoire LAREG se rattache au thème des systèmes de référence terrestres. On distinguera ce qui se rapporte à la nature de ces activités (collecte et gestion des données, analyse, interprétation) de ce qui est orienté vers la participation à un service international, un projet ou une campagne (IERS, IGS, EUREF, DORIS, SIRGAS, SCAR).

### Travaux pour l'IERS

Depuis 1988, l'ITRS est réalisé annuellement, par combinaison de jeux de coordonnées et de vitesses de stations provenant des centres d'analyse VLBI, LLR, GPS (depuis 1991), SLR et DORIS (depuis 1994). L'ITRF94 est la dernière réalisation en date de l'ITRS, à partir des différentes solutions individuelles reçues par le Bureau Central de l'IERS en 1995 et réparties en deux classes : 1 et 2. Une solution est retenue en classe 1 si elle :

- comprend des positions et des vitesses estimées,
- est fournie en format ISEF1/SINEX avec matrice complète de variances-covariances entre positions et vitesses,
- est de bonne qualité.

L'ITRF94 consiste en deux jeux de coordonnées combinées; à l'époque 88,0 et 93,0, et un champ de vitesses issu de ces deux jeux. Ont été utilisées dans cette réalisation, les solutions de classe 1 : quatre solutions VLBI, trois solutions GPS, deux solutions SLR et trois solutions DORIS. Notons que des solutions DORIS ont été utilisées pour la première fois cette année. Les solutions de classe 2 ont été comparées a posteriori à l'ITRF94.

Dans le cadre de l'amélioration des produits ITRF, plusieurs aspects nouveaux ont été étudiés et mis en œuvre dans l'établissement de l'ITRF94, et en particulier :

- les matrices complètes de variances-covariances entre positions et vitesses ont été utilisées,
- des études spécifiques portant sur la qualité des solutions individuelles ont été entreprises en amont du calcul ITRF94 proprement dit. Ainsi, des combinaisons par technique ont été élaborées afin d'estimer les qualités relatives des solutions individuelles, les unes par rapport aux autres. De plus, ces études ont permis l'estimation des facteurs de dilatations des matrices afin de rendre les solutions individuelles compatibles entre-elles dans le but d'obtenir une combinaison globale, la plus réaliste possible en termes statistiques,

- la définition de l'ITRF94 en termes de repère de référence terrestre est basée sur :
  - l'origine est définie par une moyenne pondérée des origines de solutions SLR et GPS,
  - l'échelle est définie par une moyenne pondérée des échelles de solutions VLBI, GPS et SLR. De plus, une correction de  $0.7 \cdot 10^{-9}$  a été apportée afin d'être en accord avec les résolutions UGGI/UAI relatives à la définition du système de référence international,
  - l'orientation est alignée sur celle de l'ITRF92,
  - l'évolution temporelle est en accord avec celle du modèle géophysique NNR-NUVEL1A,
- les stations de l'ITRF94 ont été classées en fonction de leur qualité ....

L'analyse complète et les résultats de l'ITRF94 sont publiés sur le réseau Internet ainsi que dans la Note Technique de l'IERS n° 20.



## Amélioration des méthodes d'analyse

L'action GEOMIX concerne le développement d'une version moderne de logiciel de combinaison de données de Géodésie Spatiale dans le but de réaliser un système de référence de qualité. S'il y a quelques années, les modèles déterministes utilisés pour la réduction des mesures étaient suffisants en regard de la précision des observations, la tendance s'est inversée clairement dans les années 1994-1995, et le bruit de modèle semble aujourd'hui prédominant dans le bruit général de réduction. A l'IGN, l'outil principal utilisé pour la réalisation du Système International de Référence Terrestre (ITRS en anglais) jusqu'à présent, SSCMIX, a été développé, pour l'essentiel, en 1989. Dans cette optique, il s'est avéré essentiel, au début de l'année 1995, d'élaborer une nouvelle génération de logiciel de combinaison de données : GEOMIX. Le projet de développement, lancé en avril 1995 [DANIEL 95] [BOUCHER 95a], doit aboutir à deux étapes principales dans la vie du logiciel : une première étape qui vise à permettre la prise en compte simultanée des vitesses et coordonnées de points (à titre de comparaison, SSCMIX ne combinait que des jeux de coordonnées), et une deuxième étape, où tout type d'information relative aux systèmes de référence céleste et terrestre, ainsi qu'à leur lien (pôle, Temps Universel), est susceptible d'être combiné.

Par ailleurs, l'objectif est d'être capable d'entreprendre le calcul de la solution de référence de l'ITRS devant paraître fin 1996, à l'aide de la première phase de GEOMIX. D'autre part, l'un des volets de la thèse de Patrick Sillard, débutée en novembre 1995, est consacré à la modélisation statistique de GEOMIX. Plus précisément, la combinaison de données, par essence hétérogènes, induit la nécessité d'une pondération soignée dans le processus d'estimation par moindres-carrés. Par expérience, on a constaté que les contraintes diversement appliquées par les centres d'analyses de l'IERS, dans les calculs de réduction des observations de Géodésie Spatiale, conduisent à une hétérogénéité flagrante. La prise en compte de cette situation [DAVIES, BLEWITT 95], par l'intermédiaire de traitements a priori des variances [HEFLIN 93] et de tests sur des estimateurs, à développer, est essentielle. Les autres axes de recherche, non couverts par le précédent sujet de thèse, concernent bien évidemment, le modèle physique d'estimation ainsi que les vastes questions d'algorithmique inhérentes à ce genre de logiciels.

## Autres activités liées au thème

Il faut brièvement mentionner les autres activités relatives aux systèmes de référence terrestres :

- participation à EUREF et en particulier au TWG, ainsi que le développement dans le cadre du CIAG d'un serveur Web pour EUREF,
- réalisation de campagnes GPS (SCAR, SIRGAS) et participation aux développements et opérations des réseaux DORIS ou IGS.

## Références

- [ALTAMIMI et al 95a] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Duhem : *Le système de référence terrestre de l'IERS : ITRF'93 et perspectives*, Journées de la Recherche IGN, Saint-Mandé (F), 20-21 mars 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 005, 1995.
- [ALTAMIMI et al 95b] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Daniel : *Preliminary analysis of the International Terrestrial Reference Frame 1994 (ITRF'94)*, IUGG XXI General Assembly, Boulder (USA), 2-14 July 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 019, 1995.
- [BOUCHER 94] C. Boucher : *Global Vertical References and the IERS Terrestrial Reference System (ITRS) : concepts and realizations*, International Symposium INSMAP'94, Hanover (D), IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 006, 1994.
- [BOUCHER 95a] C. Boucher : *Programme GEOMIX*, présentation au Conseil Scientifique National du Bureau Central de l'IERS, Paris (F), 26 avril 1995.
- [BOUCHER 95b] C. Boucher : *The International Terrestrial Reference Frame (ITRF) : Proposals for an improved strategy*, ITRF workshop, Paris (F), 8-9 May 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 011, 1995.
- [BOUCHER 95c] C. Boucher : *ITRF and IGS Regional Densifications*, 1995 IGS Workshop, Potsdam (D), May 15-17, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 017, 1995.
- [BOUCHER 95d] C. Boucher : *Report to the IERS Terrestrial Reference Frame Section (ITFS) to the IERS Directing Board*, IERS Directing Board Meeting, San Francisco (USA), December 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 023, décembre 1995.
- [BOUCHER et al 95a] C. Boucher, S. Botton & L. Duhem : *Le Réseau de Référence Français, interface du réseau européen EUREF et du Réseau Géodésique Français (RGF)*, Journées de la Recherche IGN, Saint-Mandé (F), 20-21 mars 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 003, 1995.
- [BOUCHER et al 95b] C. Boucher, W. Gurtner & G. Wöppelmann : *The European Primary Tide gauge Network*, présenté au Symposium EUREF, Helsinki (SF), 3-6 décembre 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 10.
- [DANIEL 95] L. Daniel : *Séquence projet GEOMIX*, note LAREG 95.160, avril 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, 1995.
- [DANIEL et al 95] L. Daniel, Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *Planification et suivi pour l'activité «Systèmes de référence»*, à paraître, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série SP 002, 1995.

- [DAVIES, BLEWITT 95] P. Davies & G. Blewitt : *Type two associate analysis at Newcastle-Upon-Tyne*, IGS workshop, Potsdam (D), 15-18 May 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, 1995.
- [HEFLIN 93] MB. Heflin : *Generalized No-fiducial Approach to Global Geodesy*, Interoffice Memo 335.4-93-013, Jet Propulsion Laboratory, 1993.
- [SILLARD 96] P. Sillard : *Le géoïde en Relativité Générale*, Journée Relativité du GRGS, Paris (F), 8 janvier 1996, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 009, 1996.
- [WILLIS 95] P. Willis : *DORIS and the IERS Terrestrial Reference Frame : Open questions and comments*, ITRF workshop, Saint-Mandé (F), 8-9 mai 1995, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série CM 013, 1995.
- [WILLIS, BOUCHER 95] P. Willis & C. BOUCHER : *L'unification des Références Géodésiques : l'exemple du Tunnel sous la Manche*, XYZ 62/1995, pp. 15-21, IGN, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, laboratoire LAREG, Série T 001, 1995.

## C.4.2 Géoïde

par Henri Duquenne et Zhiheng Jiang

### Introduction

Dans le cadre des études menées à l'IGN sur la détermination de géoïdes locaux ou régionaux précis, Zhiheng Jiang poursuit sa thèse au Laboratoire de Recherches en Géodésie depuis le 16 septembre 1994 sous la direction de Georges Balmino (Bureau Gravimétrique International) et le tutorat de Henri Duquenne. Le sujet de cette thèse est : «Méthodologie de la détermination du géoïde à partir de données gravimétriques, altimétriques et géodésiques. Application à la réalisation d'une référence verticale opérationnelle dans le cadre du nouveau réseau géodésique français».

### Travaux réalisés en 1995

Dans la continuité des analyses antérieures, M. Jiang a poursuivi les études sur trois thèmes importants :

#### *Techniques d'intégration*

La mise en œuvre de la méthode de Stokes associée aux techniques de retrait-restauration du modèle de champ et des effets du terrain nécessite l'évaluation numérique de plusieurs intégrales, posant des problèmes ardues d'exactitude et de temps de calcul. Une méthode originale d'intégration rapide, préconisée dès 1994, a été implémentée dans le logiciel «PILI» et comparée aux méthodes traditionnelles. Les tests ont porté sur la région Provence, Alpes, Côte d'Azur, choisie pour son relief accidenté. Les résultats montrent que, sans perte de précision, le temps de calcul est divisé par quatre vingt.

#### *Techniques d'interpolation*

En région montagneuse ou en bord de mer, les données gravimétriques ponctuelles qu'il faut transformer en grille présentent une variabilité importante et une répartition défavorable. Plusieurs techniques ont été incorporées au logiciel PILI et testées (collocation, moyennes pondérées, fenêtre glissante). Il s'avère que la collocation, généralement employée, n'est pas la meilleure méthode lorsque le lot de données gravimétriques à traiter ne peut pas être décrit statistiquement par un petit nombre de paramètres.

#### *Techniques d'adaptation*

L'utilisation d'un géoïde gravimétrique pour les opérations de nivellement par GPS nécessite une adaptation du géoïde aux références des réseaux géodésique et de nivellement. Il faut de plus tenter de résorber les erreurs et fautes imputables à chacune des techniques. Une méthode d'ajustement combinant des différentes données et plusieurs modèles d'erreurs a été développée et programmée. Les tests menés dans les Alpes, donc dans des conditions difficiles, ont montré qu'on peut ainsi transformer un géoïde local en référence altimétrique, avec une précision de 3,5 à 4,5 centimètres.

Un thème secondaire a été investigué, qui concerne la réalisation d'une référence verticale par un semis de points spatiaux nivelés, en améliorant l'interpolation par des corrections de terrain. Cette méthode, quoiqu'elle ne réalise pas exactement un géoïde, pourrait être utile pour des opérations de nivellement par GPS dans des zones dépourvues de gravimétrie. Elle a donné sur les Alpes du Sud une précision de l'ordre de 9,5 centimètres.

## Prolongements envisagés

L'année 1996 sera consacrée à la rédaction de la thèse. En particulier, il est prévu de réaliser un géoïde gravimétrique couvrant le sud de la France et permettant des tests sur une surface importante.

## Publications

[JIANG 95] Jiang Z. : *PILI, A New Software for the Geoid Determination*, XXI Assemblée Générale de l'IUGG, Boulder (USA), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 022, juin 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95a] Jiang Z. & H. Duquenne : *On the combined adjustment of a gravimetrically determined geoid and GPS levelling stations*, accepté par le «Journal of Geodesy», IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95b] Jiang Z. & H. Duquenne : *Fast integration of the integrals of Stokes; potential and terrain correction in geoid determination*, in Annales de l'EGS95, Session G4, in Reports of the Finnish Geodetic Institute, volume 95-7, Massala (SF), 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 008, 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95c] Jiang Z. & H. Duquenne : *Optimal fitting of gravity geoid to GPS levelling points*, in Annales de l'EGS95, Session G4, in Reports of the Finnish Geodetic Institute, volume 95-7, Massala (SF), IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 021, 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95d] H. Duquenne & Z. Jiang : *The geoid in the southern Alps of France*, In : *New geoids in the World*, publication commune : Bureau Gravimétrique International, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 77, in International Geoid Service, bulletin n° 4, préimpression, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série MM 009, 1995.

[POITEVIN et al. 95] C. Poitevin, Z. Jiang & M. Everaert : *Le géoïde gravimétrique en Belgique, Photogrammétrie, in Télédétection et Cartographie*, n° 197-198, Bruxelles (B), 1995.

## C.4.3 Niveau des mers

par Guy Wöppelmann et Claude Boucher

Le travail effectué cette année dans le cadre de ce thème de recherche poursuit essentiellement les actions entamées l'an dernier :

Notre projet de réseau EPTN a reçu un accueil enthousiaste par les communautés scientifiques océanographique et géodésique :

- d'abord à Bordeaux, en février 1995, lors du Meeting de l'IOC GLOSS Group of Experts. Les discussions nous ont conduit à réunir nos efforts avec ceux des chercheurs du Proudman Oceanographic Laboratory et de l'Université de Newcastle upon Tyne [WOODWORTH et al 95],

- ensuite à Helsinki en mai 1995, à l'occasion du Symposium EUREF [BOUCHER et al 95]. Le Groupe Technique EUREF de l'Association Internationale de Géodésie a mis en place une équipe, à laquelle nous participons activement, qui est chargée de définir le réseau européen EUVN et de préparer la campagne GPS associée, prévue pour 1997.

Dans les deux cas, le succès de notre proposition provenait du besoin, également identifié par d'autres groupes de chercheurs, de mettre en place un réseau analogue à EPTN. A Bordeaux, l'accent était mis sur l'aspect surveillance du niveau des mers par l'utilisation combinée des techniques de marégraphie et de géodésie spatiale, alors que, à Helsinki, il était mis sur l'unification des références verticales européennes.

Les travaux géodésiques effectués en octobre 1994 dans le cadre du projet «NIVEAU de la MER» (NIVMER) ont été décrits dans un rapport de mission [LE PROVOST, WÖPPELMANN 95]. Il s'agissait essentiellement de travaux de base, reconnaissance et monumentation, ainsi que de quelques rattachements géodésiques locaux. Le programme NIVMER fait l'objet d'une demande annuelle de financement auprès du PNEDC et de l'IFRTP. Ce mode de fonctionnement est inadapté à ses objectifs scientifiques à long terme [LE PROVOST et al 95]. Un dossier est en cours de préparation par le responsable scientifique, C. Le Provost (IMG/LEGI), pour une reconnaissance et une prise en charge du réseau dans le cadre des «Systèmes Scientifiques d'Observation Nationaux», en réponse à l'appel à idées de l'INSU. L'IGN est l'un des partenaires identifiés pour s'occuper du rattachement géodésique des marégraphes dans le système de référence géocentrique du Service International de la Rotation de la Terre (IERS).

Le groupe de travail «Géodésie et Niveau des Mers», établi l'an dernier par le CNFGG, s'est réuni à plusieurs reprises. Ce groupe rassemble des chercheurs travaillant en France dans des organismes et des domaines assez diversifiés. Lors de la réunion consacrée aux techniques de marégraphie, nous avons présenté nos activités récentes concernant le marégraphe de Marseille [WÖPPELMANN 95]. Le groupe a déploré l'interruption, depuis 1988, de la série temporelle séculaire d'observations instantanées de cet instrument. En conséquence, il a été convenu d'émettre une recommandation pour la prochaine Assemblée Générale du CNFGG.



Suite à l'appel à propositions d'études sur le niveau des mers du Ministère de l'Environnement, notre projet SONEL a été accepté dans le cadre de leur programme. L'objet de SONEL est d'étudier les spécifications d'un système de collecte, d'analyse et de diffusion de données sur le niveau des eaux côtières des territoires français. Ce système offrira en particulier des données de niveau moyen exprimées à la fois par rapport à la côte et dans un système de référence terrestre géocentrique. Il devrait exploiter au mieux les techniques marégraphiques et géodésiques.

Le travail de thèse de Guy Wöppelmann s'est poursuivi en accord avec le plan de travail détaillé, établi en mai à l'issu d'une réunion entre l'intéressé et les directeurs de recherche (Claude Boucher et C. Le Provost). L'étude du signal marégraphique s'est appuyée sur l'analyse des séries temporelles de moyennes mensuelles et annuelles disponibles au serveur Internet du PSMSL, mais aussi sur les données originales du marégraphe de Marseille disponibles à l'IGN. L'analyse des données marégraphiques en vue de déterminer les variations eustatiques récentes, ou de prédire leur évolution dans un avenir proche, présente de nombreuses difficultés liées à la nature même des données et à leur répartition sur les côtes du globe. Une revue des travaux publiés sur ce sujet montre les différentes stratégies imaginées et hypothèses établies pour traiter ces difficultés. La dispersion des résultats obtenus jusqu'à présent révèle l'ampleur des incertitudes qui subsistent encore. En attendant que les projets d'observations, tels que ceux auxquels nous participons (voir ci-dessus), se mettent en route et fournissent les données nécessaires, nous nous proposons d'étudier la contribution de la géodésie spatiale à cette problématique par des simulations.

## Sigles

CNFGG :	Comité National Français de Géodésie et de Géophysique
EPTN :	European Primary Tide Gauge Network
EUREF :	EUropean Reference Frame
EUVN :	EUropean Vertical GPS reference Network
IFRTP :	Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires
IMG/LEGI :	Institut Mécanique de Grenoble / Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels
INSU :	Institut National des Sciences de l'Univers
IOC :	Intergovernmental Oceanographic Commission
GLOSS :	Global Sea-level Observing System
PNEDC :	Programme National d'Étude de la Dynamique du Climat
PSMSL :	Permanent Service for Mean Sea level
SONEL :	Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales

## Références

- [BOUCHER et al 95] C. Boucher, W. Gurtner & G. Wöppelmann : *The European Primary Tide gauge Network*, présenté au Symposium EUREF, Helsinki (SF), 3-6 décembre 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 10.
- [LE PROVOST, WÖPPELMANN 95] C. Le Provost & G. Wöppelmann : *Rapport de mission : Campagne NIVMER94, à bord du Marion Dufresne*, rapport de mission des manipulations effectuées dans les sites de Crozet-Kerguelen-Amsterdam-Saint Paul, OP 94/4-4, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1995.
- [LE PROVOST et al 95] C. Le Provost, JM. Molines, F. Lyard & G. Wöppelmann : *Long term sea level observation programme in the South Indian ocean. A french contribution to WOCE, GLOSS and GOOS*, Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) Workshop Report 115, pp. 31-33, Bordeaux (F), 31 janvier 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1995.
- [WOODWORTH et al 95] PL. Woodworth, TF. Baker, G. Blewitt, C. Boucher & G. Wöppelmann : *A European Network for Sea Level and Coastal Land Level Monitoring*, soumis à publication, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1995.
- [WÖPPELMANN 95] G. Wöppelmann : *Le cas particulier de l'étalonnage du marégraphe de Marseille*, présentation à la réunion du Groupe de Travail du CNFGG «Géodésie et Niveau des Mers», Saint-Mandé (F), 24 mars 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 16, 1995.

## C.4.4 DORIS

par Pascal Willis

### Introduction

Le système spatial DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite) est utilisé à l'IGN principalement pour des applications de géodésie précise. Le logiciel utilisé est le logiciel GIPSY-OASIS II, développé au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena (USA). Ce logiciel, prévu initialement pour traiter des mesures du système américain GPS (Global Positioning System) a été étendu par l'IGN au traitement des mesures DORIS [WILLIS 95a].

Actuellement, trois satellites DORIS sont utilisables (SPOT-2, SPOT-3 et TOPEX/POSEIDON). Un effort important a tout d'abord été conduit à l'IGN pour automatiser la chaîne de traitement et la rendre la plus opérationnelle et conviviale possible.



## DORIS au sein de l'IERS

L'année 1995 a surtout été marquée par l'acceptation par l'IERS (International Earth Rotation Service) de la proposition française d'inclure DORIS comme nouvelle technique de l'IERS.

L'IGN a été accepté comme centre de données international (deux dans le monde), comme centre d'analyse (sept dans le monde) et comme centre unique de coordination.

En particulier, l'IGN, en temps que centre d'analyse a fourni une première solution du pôle (pour TOPEX seul) dont la précision est de l'ordre de deux mas [WILLIS, GAMBIS 95]. De plus, une première solution position/vitesse des cinquante stations du réseau permanent de poursuite DORIS a été soumise à l'IERS [WILLIS 95e].

La comparaison avec les autres techniques de l'IERS (VLBI, SLR, LLR, GPS) montre un accord de l'ordre de un à deux centimètres pour des durées de plusieurs mois à quelques années.

C'est en 1995, la meilleure solution DORIS avec celle de l'Université du Texas.

## DORIS en mode multi-satellites

De plus, fin 1995, le logiciel a été encore amélioré pour pouvoir traiter simultanément les données des trois satellites DORIS disponibles [WILLIS 95f].

Cette approche originale (et première dans le domaine) a permis d'obtenir des résultats de positionnement extrêmement précis pour de faibles durées d'observation (typiquement cinq centimètres en un jour et deux centimètres en une semaine).

## Conclusion

Ces résultats sont très encourageants et montrent tout l'intérêt du système DORIS pour la maintenance et la réalisation d'un système de référence géodésique mondial de précision centimétrique.

Il est important de prolonger l'action IERS en soumettant en 1996 une nouvelle solution prenant en compte l'ensemble des données DORIS disponibles (positions/vitesses et pôle).

La recherche sur les calculs multi-satellites doit de plus se prolonger, en collaboration avec le JPL, par des calculs combinés DORIS/GPS dans le cadre de la mission océanographique TOPEX/POSEIDON.

## Références

[WILLIS 95a] P. Willis : *DORIS nouvelle technique de l'IERS*, Journées Recherche IGN, Saint-Mandé (F), 20-21 mars 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 004, 1995.

[WILLIS 95b] P. Willis : *DORIS nouvelle technique de l'IERS : Apport à l'altimétrie radar*, réunion préparatoire au Science Working Team Topex/Poseidon de Biarritz, Toulouse (F), 24 avril 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 014, 1995.

[WILLIS 95c] P. Willis : *DORIS, nouvelle technique de l'IERS*, Compte-rendu d'activité, Conseil Scientifique National du Bureau Central de l'IERS, Paris (F), 26 avril 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 015, 1995.

[WILLIS 95d] P. Willis : *Script TIESTA : Creating a STACOV file containing the local tie information (position and velocity)*, mai 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série MM 07, 1995.

[WILLIS 95e] P. Willis : *DORIS and the IERS Terrestrial Reference Frame : Open questions and comments*, ITRF workshop, Saint-Mandé (F), 8-9 mai 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 013.

[WILLIS & GAMBIS 95] P. Willis et D. Gambis : *Polar motion derived from DORIS technique*, IERS Workshop, Paris (F), 10-12 mai 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CM 012, 1995.

[WILLIS 95f] P. Willis : *Compte-rendu de mission au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena (USA)*, 30 novembre-8 décembre 1995, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, Série CR 002, 1995.

## C.4.5 Analyses GPS

par Serge Botton, Marie-Noëlle Bouin et Didier Maillard

### Introduction

Aujourd'hui le GPS est une technique majeure de géodésie spatiale. La qualité des résultats obtenus lui permet aussi bien de contribuer à la réalisation de l'ITRF, qu'à la détermination de réseaux scientifiques à buts géophysiques.

La communauté internationale a développé depuis 1992 un service, l'IGS (International GPS Geodynamic Service) qui contribue à améliorer les résultats obtenus. En effet l'IGS fournit des orbites précises et des paramètres de rotation de la terre très précis et contribue par des solutions globales sur l'ensemble de ces cinquante trois stations de poursuite au calcul de l'ITRF.

L'action de l'IGN dans le domaine de la recherche en GPS s'oriente selon plusieurs axes :

- Une participation au centre européen CODE, qui est centre d'analyse pour l'IGS; cet engagement permet de maintenir nos compétences dans le domaine des calculs de grande précision et d'avoir en permanence la dernière version du Bernese Software, logiciel de traitement de données GPS développé à l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne (CH).

- Le calcul de campagnes scientifiques à buts géophysiques, en collaboration avec des organismes externes (ENS et ORSTOM).

### Calculs GPS au laboratoire LAREG et participation à CODE

La collaboration avec le centre de calcul CODE nous a permis de récupérer en 1995 la version 3.5 du Bernese Software. Celle-ci intègre toutes les recherches et développements effectués depuis le début de l'IGS.

Afin de calculer des réseaux de stations permanentes, nous avons, au laboratoire LAREG, développé une version automatique du Bernese Software, qui permet de lancer des calculs journaliers quasiment sans intervention humaine.

Cela a été fait afin de calculer les futures stations françaises permanentes de Brest et de Marseille.

Le calcul de la partie française de la campagne What-a-Cat a été réalisé au laboratoire LAREG. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux publiés par le DGFI (Deutsches Geodätisches Forschung Institut) à mieux que le centimètre.

### Projet de tecto-géodésie GSLNH (Géodésie Spatiale Loyauté / Nouvelles Hébrides)

Ce projet se fait en collaboration avec l'ORSTOM de Nouméa avec, comme contribution du laboratoire LAREG, la participation de Didier Maillard.

Ce projet vise à mettre en évidence les éventuels liens entre la sismicité et les déplacements superficiels au niveau de la zone de subduction des Nouvelles Hébrides.

Les déplacements sont mesurés au moyen de deux types d'équipements de géodésie spatiale : des récepteurs GPS et des balises de localisation DORIS.

Le travail de Didier Maillard a consisté pour l'instant dans le traitement des données GPS des campagnes de mesures réalisées depuis 1990 (environ deux à trois campagnes/an), aux rattachements des balises de localisation DORIS au réseau GPS et à la préparation des nouvelles campagnes GPS.

Dans le cadre d'une convention liant le programme avec les administrations locales, Didier Maillard est aussi amené à réaliser des présentations et des cours de géodésie.

## GPS et Antarctique, collaboration IGN-ENS

Le but de ce projet est d'étudier le rebond postglaciaire en Antarctique. Pour cela Marie Noëlle Bouin fait une thèse au laboratoire de géophysique de l'ENS, qui fait suite à un stage de DEA effectué au printemps 1995.

Son travail a été le suivant :

- Étude bibliographique concernant les variations de masse de glace que l'on est susceptible d'attendre depuis la fin de la dernière glaciation, et évaluation des mouvements du sol que l'on peut espérer détecter.
- Traitement de trois jeux de données GPS provenant de stations permanentes antarctiques : réseau de trois stations durant cinq cents jours environ, réseau de trois autres stations durant deux cents jours (susceptible de se prolonger plus longtemps), réseau de quatre stations durant deux cents jours. On a traité une à deux sessions de vingt quatre heures par semaine.
- Interprétation des résultats : calcul et comparaison des répétabilités, comparaison avec les variations des retards atmosphériques.

## Conclusion

La compétence obtenue aujourd'hui dans les traitements de données GPS permet au laboratoire LAREG de collaborer avec des laboratoires extérieurs de géophysique dans le cadre d'étude réclamant un positionnement très précis.

Le calcul automatique de données provenant de stations permanentes permet d'étudier des phénomènes sur le long terme impossibles à mettre en évidence par des campagnes ponctuelles, parmi ceux-ci l'étude de l'évolution du niveau des mers ou du rebond postglaciaire.

## Références

- [BOUIN 95] MN. Bouin : *Traitement de données GPS en Antarctique*, rapport de stage de DEA d'Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, Observatoire de Paris, Juin 1995.
- [CALMANT et al 95] S. Calmant, P. Lebellegard, F. Taylor, D. Maillard & J. Recy : *Geodetic measurements of convergence across the New Hebrides subduction zone*, in Geophysical Research Letter, octobre 1995.
- [MAILLARD et al 95a] D. Maillard, S. Calmant, P. Lebellegard & A. Gervaise : *Comparaison des récepteurs GPS Ashtech Z-XII et Leica SR299*, Notes Techniques Géologie-Géophysique ORSTOM : N08/1995 SR299 N09/1995.
- [MAILLARD et al 95b] D. Maillard, S. Calmant, P. Lebellegard & A. Gervaise : *Détermination par GPS des îles Chesterfield*, soumis à publication, 1995.
- [ROTHACHER et al 95] M. Rothacher, R. Weber, E. Brockmann, G. Beutler, L. Mervart, U. Wild, A. Wiget, C. Boucher, S. Botton & H. Seeger : *Annual Report 1994 of the CODE Processing Center of IGS*, in rapport annuel 1994 de l'International GPS Service for Geodynamics, 1 septembre 1995.

## C.4.6 Le centre global de l'IGS à l'IGN

par Loïc Daniel

### Introduction

Le laboratoire LAREG gère un des trois centres de données globaux de l'IGS (International GPS Service for Geodynamics). Il assure la transmission et l'archivage des données observées et calculées par le Service. Le centre global est le point d'accès nominal pour les utilisateurs de l'IGS.

L'IGS met à la disposition les observations de son réseau mondial de stations GPS permanentes. Les délais de disponibilité sont de l'ordre de quarante huit heures, les stations européennes étant toujours disponibles en moins de vingt quatre heures. Le centre de données à l'IGN collecte les fichiers d'observations des stations européennes auprès du CNES, de l'IFAG, de l'ESOC et de l'Université de Berne (CH).

Ces organismes gèrent directement une ou plusieurs stations du réseau. Les observations du reste du réseau sont collectées auprès des deux autres centres de données globaux qui sont le CDDIS et le SIO.

### Délai de disponibilité des observations

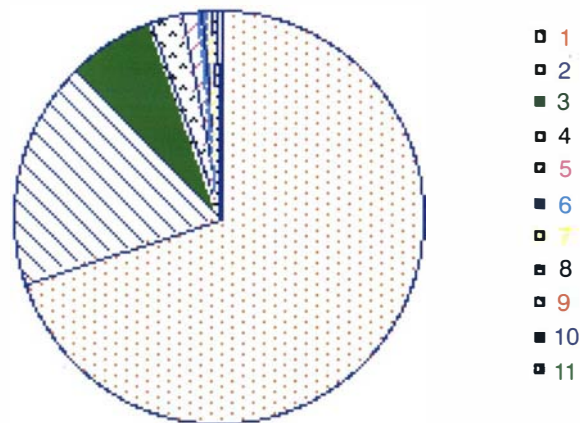


figure C.4.6.1

Les trois centres assurent une mise à jour régulière de leurs contenus respectifs, afin de proposer une interface équivalente aux utilisateurs. Ceci est fait quatre fois par jour. Au cours de l'année 1995, le nombre de stations prises en compte par l'IGN est passé à soixante dix.

Les observations restent en ligne pendant six mois, elles sont ensuite disponibles et restaurées sur demande. Les produits restent en ligne pendant un an. Le volume total des données en ligne représente environ huit Go.

Le mécanisme est le même en ce qui concerne les produits de l'IGS : éphémérides précises, horloges de satellites, paramètres d'orientation de la terre, jeux de coordonnées.

### Délai de disponibilité des éphémérides

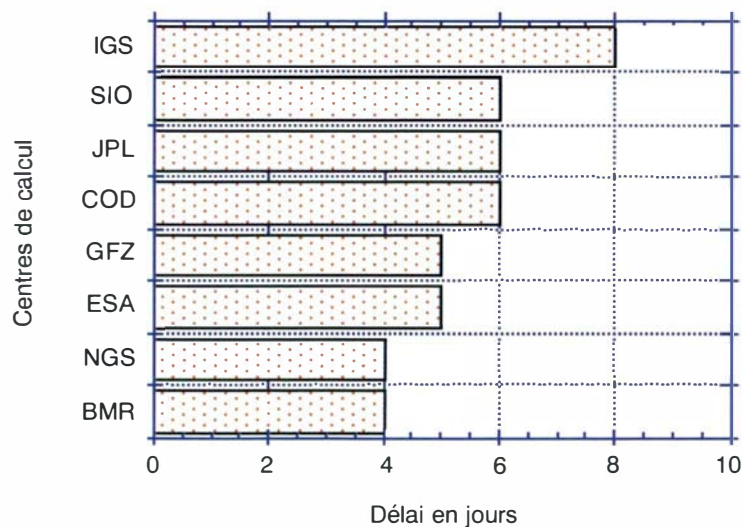


figure C.4.6.2

En 1995 les centres de calculs de l'IGS ont commencé à réaliser des solutions hebdomadaires pour les coordonnées du réseau.



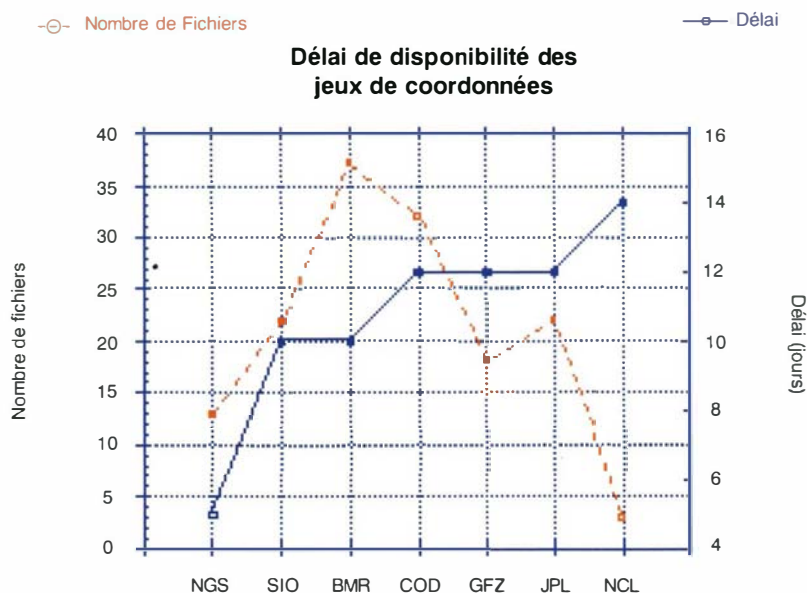


figure C.4.6.3

Les données sont distribuées aux utilisateurs à travers un serveur ftp anonyme.

Depuis le début officiel du service, cette activité est en croissance forte, avec un volume moyen de 200 Mo par mois en 1994 et un volume moyen de 1400 Mo par mois en 1995.

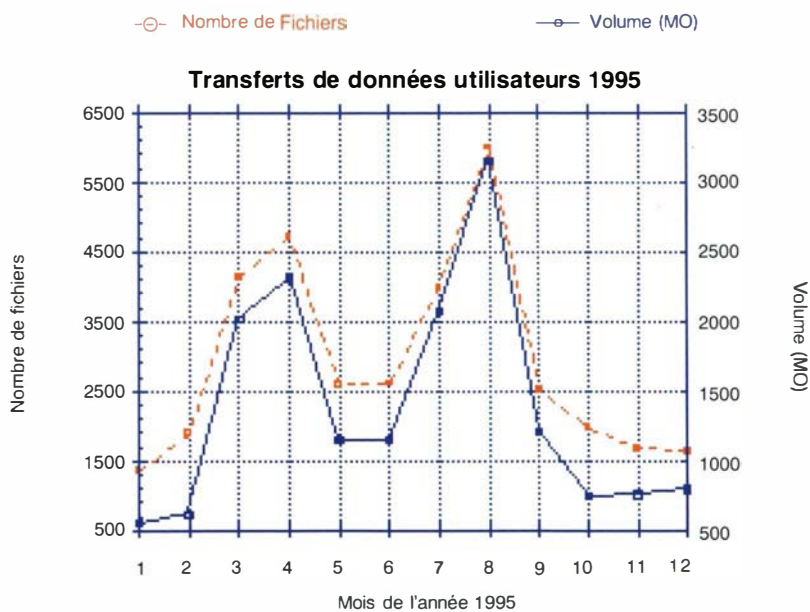


figure C.4.6.4

Les observations et les éphémérides représentent respectivement 90% et 10% du volume total. Le rapport passe à 80/20 en terme de nombre de fichiers.

Les utilisateurs proviennent d'une centaine d'organismes différents; ils sont en grande majorité européens, ce qui est cohérent avec la logique de répartition des points d'accès à travers Internet de l'IGS (deux américains et un européen).

### Principaux pays utilisateurs (classés par volume transféré)

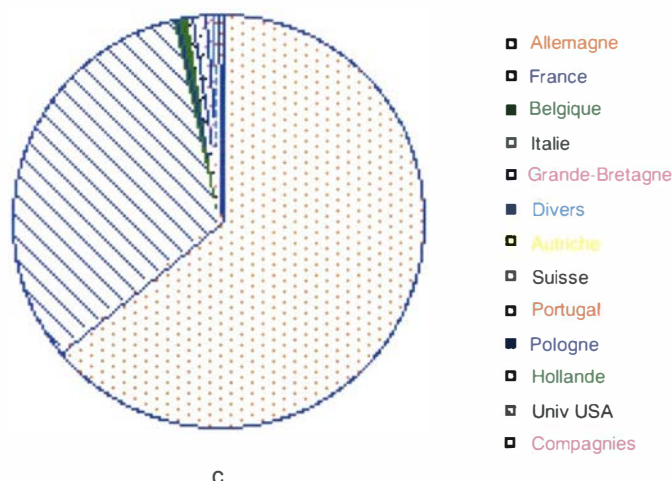


figure C.4.6.5

Le laboratoire LAREG met également à la disposition des utilisateurs un site miroir du système d'information du Bureau Central de l'IGS. C'est un serveur ftp anonyme qui contient des informations de type documentaire à propos du Service. Ceci a été mis en place afin de diminuer la charge sur le site principal qui est au Jet Propulsion Laboratory et sur les liaisons transatlantiques.

Au cours de 1995, ce serveur a été utilisé par quarante organismes différents, deux mille fichiers ont été transmis.

## C.4.7 Etude des mouvements tectoniques actuels par méthodes géodésiques

par Thierry Duquesnoy

### Introduction

La mesure directe des mouvements des plaques lithosphériques est un des thèmes de recherche en plein développement depuis l'apparition des techniques spatiales.

En effet celles-ci donnent la possibilité de travailler avec une grande précision à des échelles différentes.

En particulier, la possibilité de mesurer des réseaux à grandes échelles (plusieurs centaines de kilomètres) permet de contraindre les modèles de tectonique globale.

### Objectifs

- Détermination des mouvements instantanés (à l'échelle des temps géologiques) et absolus des plaques lithosphériques par l'utilisation des méthodes de géodésie spatiale.
- Comparaison de ces mouvements avec les mouvements relatifs à long terme des modèles de tectonique globale issues des mesures sur les failles transformantes, les mécanismes au foyer et les anomalies magnétiques.
- Détermination de la réponse lithosphérique à la dynamique terrestre.
- Détermination des vitesses de déformation à l'échelle régionale aux frontières de plaques et dans les zones intraplaques.
- Surveillance et dynamique des volcans.

## Activités - Résultats

### *Sur la faille Philippine*

La répétition des mesures sur un réseau de petites dimensions le long de la faille des Philippines en 1993 avait permis de mettre en évidence un mouvement par fluage dans cette zone [DUQUESNOY et al 94]. Ce résultat encourageant nous avait amené à mesurer à nouveau tous les réseaux que nous avons installés dans le courant de l'année 1994. Les calculs effectués en 1995 confirment les résultats de 1993 [DUQUESNOY et al 95a], avec un mouvement le long de la faille Philippine de l'ordre de 2,5 à 3 centimètres par an. Ce résultat est en accord avec les mesures effectuées par d'autres méthodes (tectoniques et étude des vecteurs glissement lors des séismes).

### *Sur la faille de Sumatra*

L'occurrence d'un séisme de magnitude  $M_w = 6,8$  - le 15 février 1994 - le long de La Grande Faille de Sumatra (Indonésie) dans la région de Liwa, près d'un des deux réseaux géodésiques que nous avons installés en 1991, nous a conduit à procéder à une répétition des mesures sur nos réseaux en septembre 1994 [DUQUESNOY et al 95b]. Les résultats de ces calculs effectués en 1995, feront l'objet d'un article en cours d'écriture proposé à Geophysical Research Letter.

## Références

- [DUQUESNOY et al 94] Th. Duquesnoy, E. Barrier, M. Kasser, M. Aurelio, R. Gaulon, RS. Punongbayan, C. Rangin & the french-Philippine Cooperation Team : *Detection of creep along the Philippine fault : first results of geodetic measurements on Leyte island, central Philippine*, in Geophys. Res. Let., 21, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOÉMI, SR 950005/L-ART, 1994.
- [DUQUESNOY et al 95a] Th. Duquesnoy, E. Barrier & M. Kasser : *Geodetic Survey of the Philippine fault*, in Terra abstracts 7, EUG Strasbourg (F), IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOÉMI, SR 950003/L-COM, 1995.
- [DUQUESNOY et al 95b] Th. Duquesnoy, O. Bellier, Ch. Vigny, M. Kasser & M. Sébrier : *Deformation co-sismique du séisme de Liwa du 15 février 1994 et évaluation du risque sismique du Sud de Sumatra (Indonésie) : apport des mesures géodésiques*, rapport DRM, IGN, Service de la Recherche, laboratoire LOÉMI, SR 950009/L-RAP, 1995.
- [DIAMENT et al 95] M. Diament, Ph. Jousset, F. Beauducel, S. Dwipa, Th. Duquesnoy : *Microgravity and elevations variations monitoring on Merapi Volcano (Indonesia)*, International Union of Geodesy and Geophysics, XXI General Assembly, Boulder (USA), 1995.

La liste suivante contient les références des publications issues du programme de recherche 1995. Elle reprend les références données dans les différents articles du Bulletin. On peut se procurer les publications en libre diffusion auprès du Service de la Recherche.

Institut Géographique National  
Service de la Recherche  
BP 68  
2 avenue Pasteur  
F-94160 SAINT-MANDÉ  
01 43 98 83 19

courrier électronique : melot@cogit.ign.fr

### Thèses de doctorat

[ABBAS 94] lyad Abbas : *Base de données vectorielles et erreur cartographique : problèmes posés par le contrôle ponctuel; une méthode alternative fondée sur la distance de Hausdorff : le contrôle linéaire*, thèse de doctorat de l'Université Paris-7 et Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Spécialité Sciences de l'information géographique, soutenue le 10 juin 1994, IGN/SR 940008/R-THE, 1994.

[ALBATTAH 89] Mahmoud Albattah : *Modélisation Géométrique et Stéréorestitution Photogrammétrique des Images Spatials Type SPOT*, thèse de Doctorat de l'Université Paris-6, 1989.

[DANG 94] T. Dang : *Restitution automatique de bâtiments*, thèse de doctorat de l'E.N.S.T., IGN/SR 940036/C-THE, décembre 1994.

### Publications

[AIRAULT, JAMET 95b] S. Airault & O. Jamet : *Détection et restitution automatiques du réseau routier sur images aériennes*, in *Traitement du Signal*, volume 12, n° 2/1995, numéro spécial RFIA 1994, été 1995, IGN/SR 940035/C-COM, 1995.

[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», bulletin de la SFPT n° 137, pp. 108-112, décembre 1994, IGN/SR 940020/C-COM, 1994.

[DUQUESNOY et al 94] Th. Duquesnoy, E. Barrier, M. Kasser, M. Aurelio, R. Gaulon, RS. Punongbayan, C. Rangin & the french-Philippine Cooperation Team : *Detection of creep along the Philippine fault : first results of geodetic measurements on Leyte island, central Philippine*, in *Geophys. Res. Lett.*, 21, IGN/SR 950005/L-ART, 1994.

[GRELOT 95a] JP. Grelot : *L'IGN à la carte*, in *Techniques et Politiques d'Equipement* n° 127, pp. 4-10, IGN/SR 950001/X-ART, février 1995.

[GRELOT 95b] JP. Grelot : *Protection juridique des bases de données géographiques : le point de vue de l'Institut Géographique National*, in *Géomètre* n° 10, pp. 37-43, IGN/SR 950004/X-ART, octobre 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95a] Jiang Z. & H. Duquenne : *On the combined adjustment of a gravimetrically determined geoid and GPS levelling stations*, accepté par le «Journal of Geodesy», IGN/ENSG/LAREG, 1995.

[JIANG, DUQUENNE 95d] H. Duquenne & Z. Jiang : *The geoid in the southern Alps of France*, In : *New geoids in the World*, publication commune : Bureau Gravimétrique International, in *Bulletin d'Information de l'IGN* n° 77, in *International Geoid Service*, bulletin n° 4, préimpression, IGN/ENSG/LAREG, Série MM 009, 1995.

[PIERROT DESEILLIGNY et al 95a] M. Pierrot Deseilligny, H. Le Men & G. Stamon : *Characters Strings Recognition on Maps : a Rotation Invariant Recognition Method*, in «Pattern Recognition Letters», IGN/SR 950014/C-ART, 1995.

[PIERROT DESEILLIGNY et al 95c] M. Pierrot Deseilligny, H. Le Men & G. Stamon : *Lecture Automatique des Ecritures sur Cartes Scannées*, article accepté pour un numéro spécial de «Traitement du Signal» reprenant certains article du CNED'94 (Congrès National sur l'Ecrite et le document), IGN/SR 950026/C-ART, 1995.

[PLAZANET et al 95] C. Plazanet, J.G. Affholder & E. Fritsch : *The Importance of geometric modeling in linear feature generalization*, *Cartography and GIS*, à paraître, IGN/SR 950038/S-ART, 1995.

[POITEVIN et al. 95] C. Poitevin, Z. Jiang & M. Everaert : *Le géoïde gravimétrique en Belgique, Photogrammétrie*, in *Télédétection et Cartographie*, n° 197-198, Bruxelles (B), 1995.

[WILLIS, BOUCHER 95] P. Willis & C. BOUCHER : *L'unification des Références Géodésiques : l'exemple du Tunnel sous la Manche*, XYZ n° 62/1995, pp. 15-21, IGN/ENSG/LAREG, Série T 001, 1995.



## Communications

- [AIRAULT, JAMET 95a] S. Airault & O. Jamet : *Digital stereoplotting & automatic image interpretation : example of the road network capture*, 17th International Cartographic Conference, Barcelona (E), September 1995, IGN/SR 950006/C-COM, 1995.
- [AIRAULT, JAMET 95c] S. Airault & O. Jamet : *Evaluation of the operationality of a semi-automatic road network capture process*, Digital Photogrammetry & Remote Sensing'95, SPIE, St-Petersburg (Russia), June 1995, IGN/SR 940043/C-COM, 1995.
- [ALTAMIMI et al 95a] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Duhem : *Le système de référence terrestre de l'IERS : ITRF'93 et perspectives*, Journées de la Recherche IGN, Saint-Mandé (F), 20-21 mars 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 005, 1995.
- [ALTAMIMI et al 95b] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Daniel : *Preliminary analysis of the International Terrestrial Reference Frame 1994 (ITRF'94)*, IUGG XXI General Assembly, Boulder (USA), 2-14 July 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 019, 1995.
- [BAILLARD et al 96] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Appariement stéréoscopique d'images aériennes en milieu péri-urbain*, RFIA 96, Rennes (F), IGN/SR 960006/C-COM, janvier 1996.
- [BARRAULT 95b] M. Barrault : *Une méthode de placement automatique des écritures des objets linéaires avec une qualité cartographique*, Congrès de l'Association de Cartographie Internationale, 17ème édition, volume 1, pp. 497-506, Barcelone (E), septembre 1995, IGN/SR 950018/S-COM, 1995.
- [BARRAULT, LECORDIX 95a] M. Barrault & F. Lecordix : *An automated system for linear feature name placement which complies with cartographic quality criteria*, in AutoCarto12, volume 4, pp. 321-330, Charlotte (USA), février-mars 1995, IGN/SR 950012/S-COM, 1995.
- [BEAUVILLAIN, GUIAVARC'H 95] E. Beauvillain & Ph. Guiavarc'h : *Evaluation d'un processus automatique de production de courbes de niveau*, 17th International Cartographic Conference, Barcelona (E), September 1995, IGN/SR 950020/C-RAP, 1995.
- [BOCK et al 95a] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & D. Fourmaintraux : *Development of a new Airborne Laser Subsidence Measurements System, aiming at mm-Accuracy*, Firth International Symposium on Land Subsidence 1, FISOLS'95, La Haye (NL), IGN/SR 950001/L-COM, octobre 1995.
- [BORDES 95a] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *GIS-Guided Interpretation of Aerial Imagery : Application to Automatic Road Extraction*, Great Lakes Conference on Digital Photogrammetry and Remote Sensing'95, juin 1995, St Petersburg (Russia), IGN/SR 950002/C-COM, 1995.
- [BORDES 95b] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Utilisation d'un système d'information géographique pour l'interprétation automatique d'images aériennes*, 17ème Conférence Cartographique Internationale, Barcelone (E), IGN/SR 950007/C-COM, septembre 1995.
- [BORDES et al 95] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *Road Extraction Guided by a Cartographic Database : Creating a Strategy*, ICCV'95, Workshop on Context Based Vision, Cambridge, MA (USA), IGN/SR 950004/C-COM, juin 1995.
- [BOUCHER 94] C. Boucher : *Global Vertical References and the IERS Terrestrial Reference System (ITRS) : concepts and realizations*, International Symposium INSMAP'94, Hanover (D), IGN/ENSG/LAREG, Série CM 006, 1994.
- [BOUCHER 95b] C. Boucher : *The International Terrestrial Reference Frame (ITRF) : Proposals for an improved strategy*, ITRF workshop, Paris (F), 8-9 May 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 011, 1995.
- [BOUCHER 95c] C. Boucher : *ITRF and IGS Regional Densifications*, 1995 IGS Workshop, Potsdam (D), May 15-17, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 017, 1995.
- [BOUCHER 95d] C. Boucher : *Report to the IERS Terrestrial Reference Frame Section (ITFS) to the IERS Directing Board*, IERS Directing Board Meeting, San Francisco (USA), December 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 023, décembre 1995.
- [BOUCHER et al 95a] C. Boucher, S. Botton & L. Duhem : *Le Réseau de Référence Français, interface du réseau européen EUREF et du Réseau Géodésique Français (RGF)*, Journées de la Recherche IGN, Saint-Mandé (F), 20-21 mars 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 003, 1995.
- [BOUCHER et al 95b] C. Boucher, W. Gurtner & G. Wöppelmann : *The European Primary Tide gauge Network*, présenté au Symposium EUREF, Helsinki (SF), 3-6 décembre 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 10.
- [BOUCHER et al 95c] C. Boucher, L. Daniel & Z. Altamimi : *New strategy for the realization of the International Terrestrial Reference System*, IUGG XXI General Assembly, Boulder (USA), 2-14 juillet 1995, série Communication, CM18, IGN/ENSG/LAREG, juillet 1995.
- [COHEN et al 87] SC. Cohen, JJ. Degnan, JL. Bufton, JB. Garvin, JB. Abshire : *The Geoscience Laser Altimetry/Ranging System*, IEEE Tr. on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE 25, n° 5, septembre 1987
- [COLLECTIF COGIT 95] *Résumés des interventions aux Journées Recherche IGN*, Saint-Mandé (F), IGN/SR 950001/S-COM, 20 mars 1995.
- [DEVOGELE & RAYNAL 95] T. Devogele & L. Raynal : *Scale-transition relationships : toward a true multi-scale reasoning and modelling*, AGDM'95, Merrickville, Ontario (CDN), 12 pages, IGN/SR 950024/S-COM, 5-6 octobre 1995.
- [DIAMENT et al 95] M. Diament, Ph. Jousset, F. Beauducel, S. Dwipa, Th. Duquesnoy : *Microgravity and elevations variations monitoring on Merapi Volcano (Indonesia)*, International Union of Geodesy and Geophysics, XXI General Assembly, Boulder (USA), 1995.
- [DISSARD, JAMET 95] O. Dissard & O. Jamet : *3-D Reconstruction of buildings from stereo images using both monocular analysis and stereo matching : an assessment within the context of cartographic production*, «Integrating Photogrammetric techniques with Scene Analysis and Machine Vision II», Orlando (USA), avril 1995, in SPIE volume 2486, pp. 255-266,

- [DUQUESNOY et al 95a] Th. Duquesnoy, E. Barrier & M. Kasser : *Geodetic Survey of the Philippine fault*, in Terra abstracts 7, EUG Strasbourg (F), IGN/SR 950003/L-COM, 1995.
- [FRITSCH, LAGRANGE 95] E. Fritsch & JPh. Lagrange : *Spectral representations of linear features for generalization*, COSIT'95, Vienne (A), IGN/SR 950037/S-COM, septembre 1995.
- [GRELOT 95c] JPh. Grelot : *Activities and funding of the French National Mapping Organisation*, Cambridge Conference for National Mapping Organisation 1995. Cadre économique pour les politiques commerciales des organismes cartographiques gouvernementaux, 17ème Conférence Cartographique Internationale, vol. 2, pp. 2182-2189, septembre 1995, IGN/SR 950002/X-COM, à paraître dans le Bulletin du Comité Français de Cartographie, 1995.
- [GRELOT 95d] JPh. Grelot : *IUSM Workshop on GIS/LIS : an ICA perspective*, Workshop *Current Status and Challenges of Geo-Information Systems*, Hannover (D), IGN/SR 950003/X-COM, September 1995, 1995.
- [GUÉRIN et al 95] P. Guérin, M. Pierrot Deseilligny & H. Maître : *Global Analysis of a Scanned Map for an Automatic High Level Interpretation*, Image Processing and its Applications (IPA'95), Edimbourg (UK), 3-5 juillet 1995, IGN/SR 950016/C-COM, 1995.
- [GUÉRIN, DESEILLIGNY 95] Ph. Guérin & M. Pierrot Deseilligny : *Global analysis of scanned maps for an automatic interpretation*, ICIP'95, Edinburgh (UK), IGN/SR 950016/C-COM, juillet 1995.
- [GUÉRIN, MAITRE 95] Ph. Guérin & H. Maître : *Distortion model in road networks from maps : identification and assessment*, SPIE Aerosense'95, Orlando (USA), IGN/SR 950012/C-COM, avril 1995.
- [GUIAVARC'H et al 95] Ph. Guiavarc'h, E. Beauvillain & O. Jamet : *Production automatique de courbes de niveau à partir de photographies aériennes*, 17th International Cartographic Conference, Barcelona (E), September 1995, IGN/SR 950031/C-COM, 1995.
- [HANGOUËT 95a] JF. Hangouët : *Computation of the Hausdorff distance between plane vector polylines*, AutoCarto 12, Charlotte, Caroline du Nord (USA), in actes pp.1-10, IGN/SR 950002/S-COM, février 1995.
- [JIANG 95a] Jiang Z. : *PILI, A New Software for the Geoid Determination*, XXI Assemblée Générale de l'IUGG, Boulder (USA), IGN/ENSG/LAREG, Série CM 022, juin 1995.
- [JIANG, DUQUENNE 95b] Jiang Z. & H. Duquenne : *Fast integration of the integrals of Stokes; potential and terrain correction in geoid determination*, in Annales de l'EGS'95, Session G4, in Reports of the Finnish Geodetic Institute, volume 95-7, Massala (SF), IGN/ENSG/LAREG, Série CM 008, 1995.
- [JIANG, DUQUENNE 95c] Jiang Z. & H. Duquenne : *Optimal fitting of gravity geoid to GPS levelling points*, in Annales de l'EGS'95, Session G4, in Reports of the Finnish Geodetic Institute, volume 95-7, Massala (SF), IGN/ENSG/LAREG, Série CM 021, 1995.
- [KASSER, PIERRON 88] M. Kasser & F. Pierron : *Nouveaux projets de la station de télémétrie laser de haute mobilité*, Colloque sur la mission du satellite TOPEX-POSEIDON, Centre spatial de Toulouse, CNES, 1988.
- [KASSER, PIERRON 89] M. Kasser & F. Pierron : *The French highly mobile laser system*, Laser Workshop, Matera, octobre 1989.
- [KASSER, PIERRON 91a] M. Kasser & F. Pierron : *The French highly mobile laser system*, AGU, San Francisco (USA), August 1991.
- [KASSER, PIERRON 91b] M. Kasser & F. Pierron : *Developpement d'une station très compacte de télémétrie laser sur satellites*, ICSSO'91, Conférence Internationale d'Optique Spatiale, Toulouse (F), septembre 1991.
- [KASSER, PIERRON 92] M. Kasser & F. Pierron : *The French highly mobile laser system*, 8th Symposium on Laser Ranging Instrumentation, Annapolis, 18-22 mai 1992.
- [LE PROVOST et al 95] C. Le Provost, JM. Moline, F. Lyard & G. Wöppelmann : *Long term sea level observation programme in the South Indian ocean. A french contribution to WOCE, GLOSS and GOOS*, Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) Workshop Report 115, pp. 31-33, Bordeaux (F), 31 janvier 1995, IGN/ENSG/LAREG, 1995.
- [LE PROVOST, WÖPPELMANN 95] C. Le Provost & G. Wöppelmann : *Campagne NVMER94, à bord du Marion Dufresne*, rapport de mission des manipulations effectuées dans les sites de Crozet-Kerguelen-Amsterdam-Saint Paul, OP 94/4-4, IGN/ENSG/LAREG, 1995.
- [LECORDIX 95] F. Lecordix : *Placement automatique des écritures sur la carte routière de France à partir de la BD Million*, Congrès de l'Association de Cartographie Internationale, 17ème édition, volume 1, pp. 960-964, Barcelone (E), septembre 1995, IGN/SR 950016/S-COM, 1995.
- [LOÉMI 95] Résumés des Interventions du laboratoire LOÉMI aux *Journées Recherche de l'IGN*, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Saint-Mandé (F), IGN/SR 950005/L-ACT, 20-21 mars 1995.
- [MARIANI et al 95] R. Mariani, M. Pierrot Deseilligny, Y. Lecourtier, J. Labiche & R. Mullot : *Algorithms for Hydrographic Network Reconstruction*, ICSC'95, Hong-Kong, décembre 1995, IGN/SR 950009/C-COM, 1995.
- [MARIANI et al 96] R. Mariani, F. Lecourt, M. Pierrrot Deseilligny, Y. Lecourtier & J. Labiche : *Lecture Automatique de Cartes Géographiques, Algorithmes de Reconstruction des Réseaux Hydrographiques et Routiers*, 10ème congrès «Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle», RFIA'96, IGN/SR 950005/C-COM, 1996.
- [MONIER 95a] Pascale Monier : *Représentation et caractérisation de l'information pour une généralisation du relief*, ICC'95, Barcelone (E), 3-9 septembre 1995, in Proceedings, pp. 480-485, IGN/SR 950017/S-COM, 1995.
- [MONIER 95b] P. Monier : *A Heuristic Approach to automated generalization of relief in GIS modelling*, 3rd ACM International Workshop on Advances in Geographic Informations Systems, Baltimore (USA), IGN/SR 950040/S-COM, 1-2 décembre 1995.
- [MONIER 95c] Pascale Monier : *Knowledge formalization for automated relief generalization*, in Workshop on Progress in Automated Map Generalization, Barcelone (E), 1-3 septembre 1995, IGN/SR 950041/S-COM, 1995.
- [PIERRON, KASSER 94] F. Pierron & M. Kasser : *The French FTLRS*, 9th Symposium on Laser Ranging Instrumentation, Canberra (Australie), 7 to 11 November 1994.
- [PIERROT DESEILLIGNY et al 95b] M. Pierrot Deseilligny, H. Le Men & G. Stamon : *Characters Strings Recognition on Maps : a High Level Reconstruction Method*, 3th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR'95), Montréal (CDN), 12-14 août 1995, pp. 249-252, IGN/SR 950017/C-COM, 1995.



- [PLAZANET 95a] C. Plazanet : *Measurements, characterization and classification for automated line feature generalization*, in Autocarto, Charlotte, Caroline du Nord (USA), 27 février-1 mars 1995, volume 4, pp. 59-68, IGN/SR 950001/S-COM, 1995.
- [PLAZANET 95b] C. Plazanet : *Geometry Modelling for linear feature generalization*, Autocarto12, Charlotte (USA), IGN/SR 950039/S-COM, février 1995.
- [PLAZANET 95c] C. Plazanet : *Modélisation de la géométrie des objets linéaires en vue de leur généralisation automatique*, in ICC'95, Barcelone (E), 3-9 septembre 1995, pp. 486-495, IGN/SR 950040/S-COM, 1995.
- [RAYNAL et al 95a] L. Raynal, B. David & G. Schorter : *Buildings an OOGIS prototype : experiments with Géo<sub>2</sub>*, Congrès Autocarto12, Charlotte, Caroline du Nord (USA), 10 pages, IGN/SR 950007/S-COM, février 1995.
- [REGNAULD 95b] N. Regnault : *Agrégation de bâtiments par prolongation d'arêtes existantes*, Journées Cassini, IGN/SR 950036/S-COM, 20 septembre 1995.
- [ROTHACHER et al 95] M. Rothacher, R. Weber, E. Brockmann, G. Beutler, L. Mervart, U. Wild, A. Wiget, C. Boucher, S. Botton & H. Seeger : *Annual Report 1994 of the CODE Processing Center of IGS*, in rapport annuel 1994 de l'International GPS Service for Geodynamics, 1er septembre 1995.
- [RUAS 95a] A. Ruas : *Multiple paradigms for automating map generalization : geometry, topology, hierarchical partitioning and local triangulation*, AutoCarto 12, Charlotte, Caroline du Nord (USA), in actes pp. 69-78, IGN/SR 950006/S-COM, février 1995.
- [RUAS 95b] A. Ruas : *Formalismes pour l'automatisation de la généralisation : métrique, topologique, partitionnement hiérarchique et triangulation locale*, in ICC'95, pp. 950-959, Barcelone (E), 3-9 septembre 1995, IGN/SR 950015/S-COM, 1995.
- [RUSKONÉ et al 95] R. Ruskoné, S. Airault & O. Jamet : *Road network extraction by local context interpretation*, in Europto proceedings, Paris (F), IGN/SR 950030/C-COM, 1995.
- [SILLARD 96] P. Sillard : *Le géoïde en Relativité Générale*, Journée Relativité du GRGS, Paris (F), 8 janvier 1996, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 009, 1996.
- [STUSSI et al 95] N. Stussi, A. Baudoin T. Castel & Ph. Gigord : *Radiometric correction of multi-configuration spaceborne SAR data over hilly terrain*, Symposium international : Extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres, Toulouse (F), 1995
- [TONON et al 95] M. Tonon, JPh. Cantou, P. Gigord, S. Sylvander et AC. de Caujac : *Map Coverage of French Guyana by Space Triangulation of ERS Images*, workshop ESA, 6-8 décembre 1995, Londres (GB), 4 pages, IGN/SR 950016/R-COM.
- [VAUGLIN 95a] François Vauglin : *Modeling Geometric Accuracy in GIS*, GISDATA'95 Specialist Meeting on Data Quality, Lisbonne (P), IGN/SR 950019/S-COM, juillet 1995.
- [VAUGLIN 95b] François Vauglin : *A Probabilistic Approach for the Use of Geometrical Metadata*, AGDM'95 (congrès annulé), Merrickville (Canada), IGN/SR 950022/S-COM, octobre 1995.
- [VAUGLIN 95c] François Vauglin : *Approche probabiliste pour des métadonnées sur la géométrie des objets géographiques*, Journées Recherche de CASSINI, Marseille (F), IGN/SR 950030/S-COM, novembre 1995.
- [VAUGLIN 95d] François Vauglin : *Probability Assessments for the Use of Geometrical Metadata*, article accepté à GISDATA'96 Summer Institute, Berlin (D), IGN/SR 950032/S-COM, juillet 1995.
- [WILLIS 95a] P. Willis : *DORIS nouvelle technique de l'IERS*, Journées Recherche IGN, Saint-Mandé (F), 20-21 mars 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 004, 1995.
- [WILLIS 95b] P. Willis : *DORIS nouvelle technique de l'IERS : Apport à l'altimétrie radar*, réunion préparatoire au Science Working Team Topex/Poseidon de Biarritz, Toulouse (F), 24 avril 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 014, 1995.
- [WILLIS 95c] P. Willis : *DORIS, nouvelle technique de l'IERS*, Compte-rendu d'activité, Conseil Scientifique National du Bureau Central de l'IERS, Paris (F), 26 avril 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 015, 1995.
- [WILLIS 95e] P. Willis : *DORIS and the IERS Terrestrial Reference Frame : Open questions and comments*, ITRF workshop, Saint-Mandé (F), 8-9 mai 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 013.
- [WILLIS 95f] P. Willis : *GPS pour la production et l'utilisation des canevas nationaux*, Forum-Rencontre «L'évolution des Canevas Nationaux face aux levés par GPS», Saint-Mandé (F), 7 mars 1995, série Communication, CM1, IGN/ENSG/LAREG, mars 1995.
- [WILLIS & GAMBIS 95] P. Willis et D. Gambis : *Polar motion derived from DORIS technique*, IERS Workshop, Paris (F), 10-12 mai 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 012, 1995.
- [WILLIS et al 95] P. Willis, F. Duquenne, S. Botton, M. Even, JY. Egels & P. Dutot : *Guide de l'utilisateur du GPS pour la localisation*, groupe de travail permanent du CNIG «Positionnement Statistique et Dynamique», Forum-Rencontre «L'évolution des Canevas Nationaux face aux levés par GPS», Saint-Mandé (F), 7 mars 1995, série Communication, CM2, IGN/ENSG/LAREG, mars 1995.
- [WOODWORTH et al 95] PL. Woodworth, TF. Baker, G. Blewitt, C. Boucher & G. Wöppelmann : *A European Network for Sea Level and Coastal Land Level Monitoring*, soumis à publication, IGN/ENSG/LAREG, 1995.
- [WÖPPELMANN 95] G. Wöppelmann : *Le cas particulier de l'étalonnage du marégraphe de Marseille*, présentation à la réunion du Groupe de Travail du CNFGG «Géodésie et Niveau des Mers», Saint-Mandé (F), 24 mars 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CM 16, 1995.

## Rapports internes, notes techniques, rapports d'étude, compte-rendus

- [AIRAULT 94] S. Airault : *Evaluation de la qualité géométrique d'une restitution numérique par comparaison à des restitutions analytiques*, document interne, IGN/SR 940042/C-RAP, décembre 1994.
- [BEAUVILLAIN 95] E. Beauvillain : *Evaluation d'un processus automatique de production de courbes de niveau*, rapport interne, IGN, septembre 1995, IGN/SR 950033/C-RAP, 1995.
- [Bock 95a] O. Bock : *Caractérisation du système de télémétrie laser*, 32 pages, IGN/SR 950004/L-RAP, avril 1994-mai 1995.
- [BOCK 95b] O. Bock : *Bilan de liaison et rapport signal sur bruit en télémétrie laser aéroportée*, 21 pages, IGN/SR 950007/L-RAP, mai 1995.
- [BOCK 9c] O. Bock : *Compte-rendu de l'expérimentation à Saint-Etienne de Tinée*, 17 pages, IGN/SR 950008/L-CRD, novembre 1995.
- [BOCK et al 95b] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & D. Fourmaintraux : *Développement d'un système de télémétrie laser en champ large destiné à la mesure de mouvements verticaux du sol de l'ordre du millimètre*, version française de l'article publié au FISOLS'95, IGN/SR 950002/L-RAP 1995.
- [BOUCHER 95a] C. Boucher : *Programme GEOMIX*, présentation au Conseil Scientifique National du Bureau Central de l'ERS, Paris (F), 26 avril 1995.
- [CHEYLAN et al 95] JP. Cheylan, L. Raynal, C. Mende & TS. Yeh : *Gestion du temps dans une base de données de renseignements militaires*, rapport n° 95/CEGN1/02, 1995.
- [COGIT 95] *Minutes du séjour du Professeur RB. McMaster au laboratoire COGIT*, du 22 novembre au 15 décembre 1994, IGN/SR 950004/S-CRD, 1995.
- [COGIT-MATIS 95] : *Compte-rendu de la 17ème Conférence Cartographique Internationale et de l'atelier de travail sur la généralisation*, 1-9 septembre 1995, Barcelone (E), IGN/SR 950047/S-CRD, 1995.
- [DANIEL 95] L. Daniel : *Séquencement projet GEOMIX*, note LAREG 95.160, avril 1995, IGN/ENSG/LAREG, 1995.
- [DANIEL et al 95] L. Daniel, Z. Altamimi, C. Boucher & P. Sillard : *Planification et suivi pour l'activité «Systèmes de référence»*, à paraître, IGN/ENSG/LAREG, Série SP 002, 1995.
- [DEVOGELE et al 95a] T. Devogele, JPh. Lagrange & L. Raynal : *Compte-rendu du congrès du 12-13 juillet 1995 : Bases de données et Systèmes d'Information pour l'Environnement*, Versailles (F), 6 pages, IGN/SR 950023/S-CRD, 1995.
- [DUQUENNE, JIANG 95] H. Duquenne & Z. Jiang : *The Geoid in the southern Alps of France*, Pré-impression du Bulletin commun du Bureau Gravimétrique International et de l'International Geoid Service, Série MM9, IGN/ENSG/LAREG, novembre 1995.
- [DUQUESNOY et al 95b] Th. Duquesnoy, O. Bellier, Ch. Vigny, M. Kasser & M. Sébrier : *Déformation co-sismique du séisme de Liwa du 15 février 1994 et évaluation du risque sismique du Sud de Sumatra (Indonésie) : apport des mesures géodésiques*, rapport DRM, IGN/SR 950009/L-RAP, 1995.
- [DUQUESNOY et al 95] T. Duquesnoy, O. Bellier, Ch. Vigny, M. Kasser & M. Sébrier : *Déformation de séisme, de Liwa du 15 février 1994 et évaluation du risque sismique du Sud de Sumo (Indonésie) : apport des mesures géodésiques*, 54 pages, IGN/SR 950009/L-RAP, janvier 1995.
- [FRITSCH 95] E. Fritsch : *Représentation fréquentielle des primitives linéaires pour la généralisation*, rapport de fin de scolarité, 1ère année de thèse au laboratoire COGIT, IGN/SR 950049/S-RAP, octobre 1995.
- [GUÉRIN 95a] Ph. Guérin : *Caractérisation et estimation des déformations existant sur une carte topographique : d'un modèle de déformation à un modèle de prédiction*, rapport interne, IGN/SR 950001/C-RAP, mars 1995.
- [GUÉRIN 95b] Ph. Guérin : *Apport des cartes scannées dans la détection du réseau routier en imagerie aérienne*, rapport interne, IGN/SR 950027/C-RAP, mai 1995.
- [HANGOUËT 95b] JF. Hangouët : *Structures pour la généralisation*, rapport technique, IGN/SR 950024/S-RAP, 1995.
- [HANGOUËT 95c] JF. Hangouët : *Interactions bâti-routier*, rapport technique, IGN/SR 950053/S-RAP, 1995.
- [JIANG 95b] Z. Jiang : *GRAVSOFT, Logiciel pour le calcul du Géoiide*, Série MM2, IGN/ENSG/LAREG, mars 1995.
- [JIANG 95c] Z. Jiang : *PILI, Nouveau logiciel pour le calcul du Géoiide*, série MM3, IGN/ENSG/LAREG, mars 1995.
- [JIANG 95d] Z. Jiang : *Détermination du Géoiide à l'aide de GPS*, Série MM4, IGN/ENSG/LAREG, mars 1995.
- [LECORDIX 95] F. Lecordix : *Guide de programmation dans la plate-forme ADA de généralisation*, rapport technique interne, IGN/SR 950051/S-RAP, 1995.
- [MONIER 95e] P. Monier : *Prise en compte de l'orographie dans la généralisation automatique*, bilan de deuxième année de thèse (sous la direction de M. Raffy), GSTS, Strasbourg (F), 6 pages, IGN/SR 950042/S-RAP, juin 1995.
- [RAYNAL 95] L. Raynal : *Compte-rendu de la Conférence Autocarto12 du 8 février au 1er mars 1995, Charlotte (USA)*, IGN/SR 950027/S-CRD, 22 mars 1995.
- [REGNAULD 95] N. Regnaud : *Opérateur d'agrégation : état de l'art*, 23 pages, IGN/SR 950035/S-RAP, 15 septembre 1995.
- [ROUSSEAU et al 95] D. Rousseau, T. Rousseau & F. Lecordix : *An Evaluation of Map Generalizer, an INTERGRAPH Interactive Generalization Software Package*, 30 pages, IGN/SR 950003/S-RAP, février 1995.
- [RUAS & al 95] A. Ruas, JF. Hangouët et N. Regnaud : *Notice sur les développements sous ILOG Version 2*, rapport technique, IGN/SR 950055/S-RAP, 1995.
- [SCHORTER 95] G. Schorter : *Le modèle historique de GéO<sub>2</sub>*, IGN/SR 950020/S-RAP, 17 pages, 1995.
- [SYLVANDER, GIGORD 95] S. Sylvander & Ph. Gigord : *Apport de l'imagerie ERS à la localisation de détails terrestres*, rapport d'étude rédigé pour la DME et la CEGN, IGN/SR 950019/R-RAP, 1995.
- [TABLE RONDE COGIT 95] : *Le modèle historique de GéO<sub>2</sub>*, 17 pages, IGN/SR 950020/S-RAP, 23 juin 1995.
- [THOM & JURVILLIER 95] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Mesure de la qualité radiométrique de la caméra numérique de l'IGN équipée du capteur Kodak KAF-6300*, IGN/SR 950006/L-RAP, 6 décembre 1995.
- [THOM, JURVILLIER 96] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Compte-rendu de la première mission aérienne de la nouvelle caméra numérique*, IGN/SR 960001/L-RAP, 29 janvier 1996.



- [TONON 95] M. Tonon : *Compte-rendu du workshop de l'ESA sur les applications radar ERS*, 6-8 décembre 1995, Londres (GB), 3 pages, IGN/SR 950017/R-CRD.
- [VAUGLIN 95d] F. Vauglin : *Approche probabiliste pour des métadonnées sur la géométrie des objets géographiques*, rapport interne, 16 pages, IGN/SR 950030/S-RAP, septembre 1995.
- [VAUGLIN 95] F. Vauglin : *Compte-rendu de réunion GISDATA du 5-9 juillet 1985 : Specialist Meeting on Data Quality*, Lisbonne (P), 25 pages, IGN/SR 950026/S-CRD, 17 juillet 1995.
- [WILLIS 95d] P. Willis : *Script TIESTA : Creating a STACOV file containing the local tie information (position and velocity)*, mai 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série MM 07, 1995.
- [WILLIS 95f] P. Willis : *Compte-rendu de mission au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena (USA)*, 30 novembre-8 décembre 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série CR 002, 1995.
- [WILLIS 95g] P. Willis : *Script tiesta Creating a stacov file containing the local tie information (position and velocity)*, IGN/ENSG/LAREG, Série MM 007, mai 1995.

## Rapports de stage

- [AMOUSSOU 95] Guy-Alain Amoussou : *Superposition et couches thématiques dans les bases de données géographiques*, stage de DEA Informatique, Paris-9 Dauphine, IGN/SR 950033/S-STA, septembre 1995.
- [ARBOUCHE 95] S. Arbouche : *Définir l'opérateur de désagrégation et implémenter un cas pratique de désagrégation sous le SIG Smallworld*, rapport de stage de DEA-SIG, IGN/SR 950029/S-STA, 20 septembre 1995.
- [BEAUCE 95] Vincent Beauce : *Réalisation d'une plate-forme pour la généralisation du relief*, IGN/SR 95-0045/S-STA, septembre 1995.
- [BOUIN 95] MN. Bouin : *Traitement de données GPS en Antarctique*, rapport de stage de DEA, juin 1995.
- [CAUDRELIER 95] D. Caudrelier : *Modélisation et étude des carrefours sur photographies aériennes*, rapport de stage du DEA Sciences de la Terre, IGN/SR 950028/C-STA, septembre 1995.
- [COURTEAUX 95] S. Courteaux : *Segmentation d'une base de données géographique*, rapport de DEA SIG, IGN/SR 950031/S-STA, 20 septembre 1995.
- [DJELLOUL 95] M. Djelloul : *Placement automatique des noms de rues*, rapport de stage de DESS d'Orsay, IGN/SR 950046/S-STA, septembre 1995.
- [DUBREIL 95] F. Dubreil : *Extraction du réseau routier en stéréoscopie*, rapport de projet pluridisciplinaire IT2, École Nationale des Sciences Géographiques, septembre 1995, IGN/SR 950033/C-STA, 1995.
- [DUCAS 95] V. Ducas : *Extraction semi-automatique de bâtiments dans un couple stéréo d'images aériennes*, rapport de stage du DEA VAR, INRIA Sophia Antipolis, IGN/SR 950036/C-STA, juin 1995.
- [GUIGUES 95] L. Guigues : *Détection des véhicules sur images aériennes*, rapport de stage du DEA/IARFA, Paris-6, laboratoire MATIS, IGN/SR 950029/C-STA, septembre 1995.
- [LE MEUR 95] Capitaine JC. Le Meur : *Etude et implémentation d'un algorithme de détection de route contraint par une base de données*, rapport de stage de DEA-SIG, IGN/SR 950019/C-STA, 7 septembre 1995.
- [MUSTIÈRE 95] S. Mustière : *Mesure de la qualité de la généralisation du linéaire*, rapport de stage du DESS cartographie, Université Paris-1/ENSG, IGN/SR 950044/S-STA, septembre 1995.
- [NICOLA 95] S. Nicola : *Extraction automatique du réseau routier par suivi de profils sur images aériennes numérisées*, rapport de stage de fin d'études de l'Institut National des Télécommunications, juin 1995, IGN/SR 950033/C-STA, 1995. [4]
- [PATTUS 95] JPh. Pattus : *Conception et implémentation d'une interface utilisateur appliquée à la photo-interprétation*, rapport de stage DESS AIST, Université Pierre et Marie Curie, IGN/SR 950052/S-STA, septembre 1995.
- [POUEY-MOUNOU 95] C. Pouey-Mounou : *Segmentation d'une base de données géographique. Élaboration d'une bibliographie portant sur les statistiques spatiales et analyse d'une base de données géographique en vue d'une segmentation*, rapport de stage ENSAEE, 85 pages, IGN/SR 950025/S-STA, 24 mai 1995.
- [TRÉVISAN 95] J. Trévisan : *Conception d'une BDMulti-échelles*, rapport de projet IT2, IGN/SR 950034/S-STA, 22 septembre 1995.
- [VAN HUONG 95] A. Nguyen van Huong : *Base de données multi-échelles*, mémoire en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM en informatique d'entreprise, 120 pages, IGN/SR 950014/S-STA, 24 janvier 1995.

## Cours

- [BOTTON 95] S. Botton : *Présentation du système GPS*, Module de formation ENSG «Techniques GPS», série Support de Cours, SC6, IGN/ENSG/LAREG, mars 1995.
- [BOUCHER 95] C. Boucher : *Géodésie : Notions fondamentales*, cours du premier trimestre du DEA d'Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, Paris (F), novembre 1995, IGN/ENSG/LAREG, Série SC 003, 1995.
- [DUQUENNE 95a] H. Duquenne : *Champ de pesanteur, géoïde et altimétrie : concepts fondamentaux*, série Cours, C1, IGN/ENSG/LAREG, octobre 1995.
- [DUQUENNE 95b] H. Duquenne : *Méthode des moindres carrés*, cours de DEA «Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie», série Support de Cours, SC5, IGN/ENSG/LAREG, novembre 1995.
- [DUQUENNE 95] H. Duquenne : *Traitement des observations de géodésie sur satellites*, Module de formation ENSG «Notions fondamentales en géodésie», série Support de Cours, SC4, IGN/ENSG/LAREG, mars 1995.
- [HOTTIER 96] Ph. Hottier : *Précis de statistiques*, support de cours, IGN, ENSG, 1996.
- [JULIEN 94] P. Julien : *Traitements Altimétriques (Modèles Numériques de Terrain)*, cours DEA SIG, IGN/SR 940033/C-CNF, 1994.
- [LE MEN 95] H. Le Men : *Aspects Algorithmiques du traitement d'image en cartographie*, cours du DEA IARFA, Paris-5/Ecole des Ponts et Chaussées, IGN/SR 950020/R-CNF, 1995.
- [RUAS 95c] A. Ruas : *Cours sur la généralisation*, Université d'été des pays scandinaves, IGN/SR 950054/S-CNF, 1995.

## **Contacts :**

### **Service de la Recherche**

Serge MOTET - 01.43.98.83.15

### **Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Image pour la Stéréorestitution (MATIS)**

Daniel PIQUET-PELLORCE - 01.43.98.80.81

### **Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique (COGIT)**

Sylvie LAMY - 01.43.98.84.32

### **Laboratoire d'Opto-Electronique et de Micro-Informatique (LOEMI)**

Christian THOM - 01.43.98.82.40

### **Laboratoire de REcherche en Géodésie (LAREG)**

Claude BOUCHER - 01.43.98.83.27

**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. : 01.43.98.80.00

Imprimerie de l'INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL

Dépôt légal 2<sup>e</sup> trimestre 1996  
N° d'édition : 173 - N° d'impression : 194

**En couverture** : images extraites de la première mission de la caméra numérique sur Amiens (Somme), IGN, 15 janvier 1996.



