



**HAL**  
open science

## La recherche à l'IGN : activités 1992

Hervé Le Men, Philippe Guiavarc'H, Patrick Julien, Sylvain Airault, Tuan Dang, Yanli Qian, Rémi Jayet, Iyad Abbas, Philippe Hottier, Edouard Beauvillain, et al.

► **To cite this version:**

Hervé Le Men, Philippe Guiavarc'H, Patrick Julien, Sylvain Airault, Tuan Dang, et al.. La recherche à l'IGN : activités 1992. 61, Institut géographique national. 1993. hal-02372997

**HAL Id: hal-02372997**

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372997>

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  
GEOGRAPHIQUE  
NATIONAL

**BULLETIN D'INFORMATION DE L'IGN**



*Bilan Recherche 92*

**61**

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1.</b>	<b>PRÉSENTATION GÉNÉRALE</b> ( <i>Hervé LE MEN</i> )	
1.1.	Evolution des structures et des effectifs .....	5
1.1.1.	Evolution des structures	
1.1.2.	Evolution des effectifs	
1.2.	Répartition des dépenses .....	7
1.3.	Bilan du programme de développement.....	8
1.4.	Bilan de recherche .....	9
1.4.1.	Recherches sous contrats	
1.4.2.	Programme de recherche	
<b>2.</b>	<b>IMAGE ET PHOTOGRAMMÉTRIE</b> ( <i>Olivier JAMET</i> )	
2.1.	Photogrammétrie.....	11
2.1.1.	Orientation interne d'une photographie numérique	
2.1.2.	Mise en place relative de couples stéréoscopiques	
2.2.	Extraction du relief .....	13
2.2.1.	Amélioration du corrélateur DAUPHIN	
2.2.2.	Parallélisation de la corrélation automatique	
2.2.3.	Démêlage de courbes de niveau	
2.2.4.	Généralisation de courbes de niveau	
2.3.	Extraction des thèmes planimétriques .....	19
2.3.1.	Extraction du réseau routier sur photographies aériennes	
2.3.2.	Restitution automatique des bâtiments sur couple stéréoscopique de photographies aériennes	
2.3.3.	Extraction du réseau hydrographique sur MNT	
2.3.4.	Analyse de texture sur photographies aériennes	
2.4.	Qualité des données .....	30
2.4.1.	Qualité des éléments linéaires d'une base de données	
2.4.2.	Qualité des MNT	
2.5.	Autres activités .....	36
2.5.1.	Lecture automatique de cartes scannées	
2.5.2.	Interprétation multitemporelle d'image satellite	
<b>3.</b>	<b>INSTRUMENTATION</b> ( <i>Christian THOM</i> )	
3.1	Réalisations .....	39
3.1.1.	Réalisation d'un prototype de caméra aérienne numérique	
3.1.2.	Réalisation d'une station LASER ultra-mobile	
3.1.3.	Mise au point et exploitation des données d'une caméra à comptage de photons pour l'astronomie	
3.1.4.	Simulation d'un procédé de télémétrie LASER aéroportée à champ large	
3.2	Evaluations .....	45
3.2.1	Evaluation du capteur HRG	
3.2.2	Radar spatial	
<b>4.</b>	<b>SIG ET CARTOGRAPHIE</b> ( <i>Benoît DAVID et Jean-Philippe LAGRANGE</i> )	
4.1.	Bases de données géographiques.....	47
4.1.1.	Modélisation de l'information géographique	
4.1.2.	Prototype de SGBD Orienté-Objet localisé	

4.1.3.	Etude des problèmes de précision	
4.1.4.	Gestion de BD de grande extension	
4.1.5.	Gestion du temps dans les SIG	
4.2.	Généralisation cartographique.....	81
4.2.1.	Généralisation cartographique : approche IA	
4.2.2.	Développement et tests d'algorithmes de généralisation automatique	
<b>5.</b>	<b>GÉODÉSIE (Pascal WILLIS)</b>	
5.1.	Systèmes de référence.....	94
5.1.1	Maintenance du système de référence terrestre de l'IERS	
5.1.2.	Théorie dynamique du mouvement de rotation de la Terre dans le cadre Post-Newtonien	
5.1.3.	Etude des systèmes de référence liés au projet franco-américain Topex/Poséïdon	
5.2.	Géodésie physique et nivellement.....	100
5.2.1.	Détermination du géoïde	
5.2.2.	Spécifications du réseau scientifique de nivellement français	
5.3.	Méthodes de positionnement.....	107
5.3.1.	Calcul de campagne GPS de haute précision pour des buts métrologiques de géodésie ou de géophysique	
5.3.2.	Réalisation d'un logiciel de traitement VLBI astrométrique et géodésique	
5.3.3.	Etude du couplage GPS/Inertiel	
5.4.	Géodésie pour les sciences de la Terre.....	118
5.4.1.	Rattachement géodésique de marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale	
5.4.2.	Participation aux recherches en Géophysique	
<b>6.</b>	<b>LISTE DES PUBLICATIONS</b>	
6.1.	Publications scientifiques.....	121
6.2.	Mémoires de thèses.....	123
6.3.	Publications techniques et rapports.....	123
	<b>(ILLUSTRATIONS COULEURS : pages 51 à 64)</b>	

# LA RECHERCHE A L'I.G.N.

---

*Activités 1992*

---

***En couverture : Détection des routes sur image aérienne :  
image de "confiance dans la géométrie extraite"***

L'analyse locale des profils radiométriques au cours du suivi de routes automatique fournit un indicateur qui rend compte de la qualité du positionnement sur l'axe. Cet indicateur de confiance est visualisé ici en teintes hypsométriques périodiques.



# 1 - PRÉSENTATION GÉNÉRALE

par Hervé LE MEN

Ce compte-rendu tient lieu à la fois de compte-rendu d'activités du Service de la Recherche et de bilan de l'activité de recherche pour l'IGN.

Au cours de l'année 1992, le découpage en thèmes de recherche tels qu'ils sont suivis par le CST, a été redéfini, et au 1er janvier 1993, le laboratoire COGIT a été séparé en deux unités. Actuellement, le découpage en thèmes recoupe au mieux le découpage fonctionnel en laboratoires de recherche, et c'est selon ce plan que seront présentées les activités.

Afin d'améliorer le suivi externe par le CST des activités de recherche de l'IGN, quatre groupes de travail correspondant aux quatre thèmes de recherche ont été constitués. Les membres de ces groupes, toutes personnalités extérieures à l'IGN, ont été choisis pour leur compétence scientifique personnelle dans les domaines concernés. Chacun des groupes est présidé par un membre titulaire du CST.

## Composition des groupes de travail :

### Groupe 1 - Image et photogrammétrie :

G. Stamon, EHEI, Président  
O. Jamet, IGN-MATIS, Secrétaire  
H. Maître, ENST  
A. Gagalowicz, INRIA  
R. Azencott, ENS  
E. Cubero-Castan, CNES  
G. Rückebusch, Thomson

### Groupe 2 - Instrumentation :

D. Vidal-Madjar, MRE, Président  
C. Thom, IGN-LOEMI, Secrétaire  
D. Gaultier, SAGEM  
M. Pausader, CNES  
M. Kasser, ESGT  
M. Leroy, CNES  
R. Foy, Observatoire Meudon

### Groupe 3 - SIG et Cartographie :

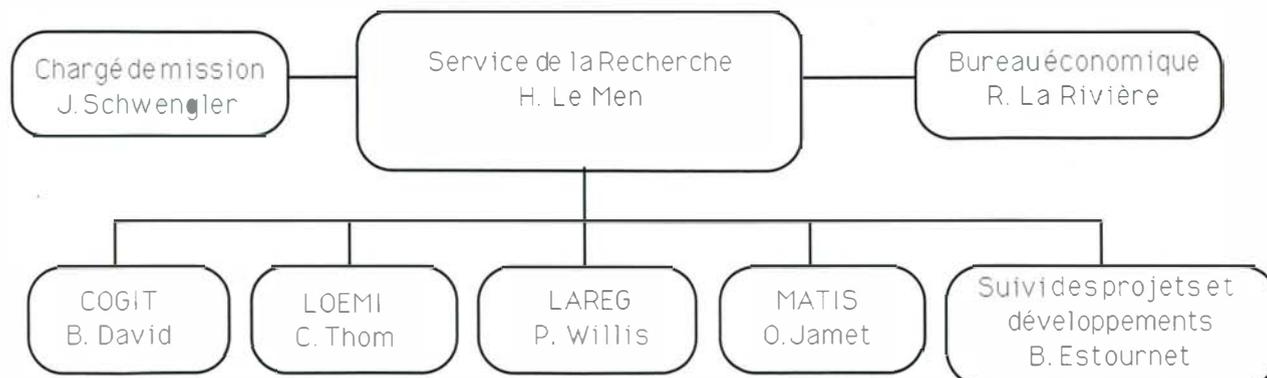
G. Benattar, MELT-DRAST, Président  
B. David, IGN-COGIT, Secrétaire  
JP. Cheylan, GIP Reclus  
A. Mangin, Scot Conseil  
J. Denègre, CNIG  
N. Smith, CERCO-GTP  
M. Scholl, CNAM  
R. Jeansoulin, Lab. Robotique  
F. Louange, Fleximage  
T. Rousselin, ETCA-CTME

### Groupe 4 - Géodésie :

G. Aubert, INSU, Président  
P. Willis, IGN-LAREG, Secrétaire  
JL. Counil, CNES  
M. Feissel, IERS  
D. Jault, IPG  
M. Le Gouic, SHOM

## 1.1 EVOLUTION DES STRUCTURES ET DES EFFECTIFS

### 1.1.1 Evolution des structures



Organigramme du Service de la Recherche au 1/1/93

Les laboratoires COGIT et MATIS ont été créés par division de l'ex-laboratoire **COGIT**.

**MATIS** : Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Image pour la Stéréorestitution. Son domaine d'activités correspond au thème *Image et Photogrammétrie*.

**LOEMI** : Laboratoire d'Optoélectronique et de Micro Informatique. Son domaine d'activités correspond au thème *Instrumentation*.

**COGIT** : Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique. Son domaine d'activités correspond au thème *SIG et Cartographie*.

**LAREG** : Laboratoire de REcherche en Géodésie. Son domaine d'activités correspond à la *Géodésie*.

Composition des laboratoires :

MATIS	COGIT	LOEMI	LAREG	
O. Jamet	B. David	C. Thom	P. Willis	JP. Dufour
P. Julien	L. Raynal	JP. Bignon	S. Boitel	L. Daniel
P. Guiavarc'h	G. Schorter	T. Duquesnoy	D. Priou	D. Toustou
E. Beauvillain	JP. Lagrange	F. Teyssonnière	L. Duhem	G. Balma
S. Airault	JG. Affholder	W. Grunspan	Z. Altamimi	M. Balcaen
T. Dang	A. Ruas	I. Jurvillier	H. Duquenne	D. Burtin
Y. Qian	F. Lecordix		S. Botton	G. Wöppelmann
R. Jayet	C. Plazanet			
C. Mauny				
F. Boyero				

### 1.1.2 Evolution des effectifs

Dans le tableau ci-dessous, on fait une répartition fictive des effectifs par unité pour permettre la comparaison : de fait le LAREG a été créé fin 1991 et la séparation du COGIT a été faite au 1/1/93. La répartition tient compte évidemment des personnes réellement présentes, et aussi du thème principal de leur activité de recherche. Par ailleurs, ce tableau ne tient compte que des personnels payés par l'IGN et travaillant à plein temps. Ne sont donc pas comptés, les thésards co-financés (2 en 1992), les thésards non payés et les stagiaires.

	Effectifs au 1 / 1 / 91	Arrivées (Départs)	Effectifs au 1 / 1 / 92	Arrivées (Départs)	Effectifs au 1 / 1 / 93
Commandement	3	5 (3)	5		5
COGIT	3	3	6	3 (1)	8
MATIS	5	6 (3)	8	3 (1)	10
LOEMI	6	2	8	(2)	6
LAREG	10	2	12	2	14
<b>Total</b>	<b>27</b>	<b>18 (6)</b>	<b>39</b>	<b>8 (4)</b>	<b>43</b>
IGG/ICG/IG	11	1 (2)	10	(1)	9
IDT/IT	8	7 (2)	13	2	15
Géomètres	1	1	2		2
Ouvriers	4	2	6	1 (1)	6
Contractuels	3	2	5	2 (1)	6
Thésards	0	3	3	3 (1)	5
<b>Total</b>	<b>27</b>	<b>16 (4)</b>	<b>39</b>	<b>8 (1)</b>	<b>43</b>

Tableau d'évolution des effectifs

Au cours de l'année 1992, l'effort fait par l'IGN sur les effectifs de personnels affectés à la Recherche s'est poursuivi.

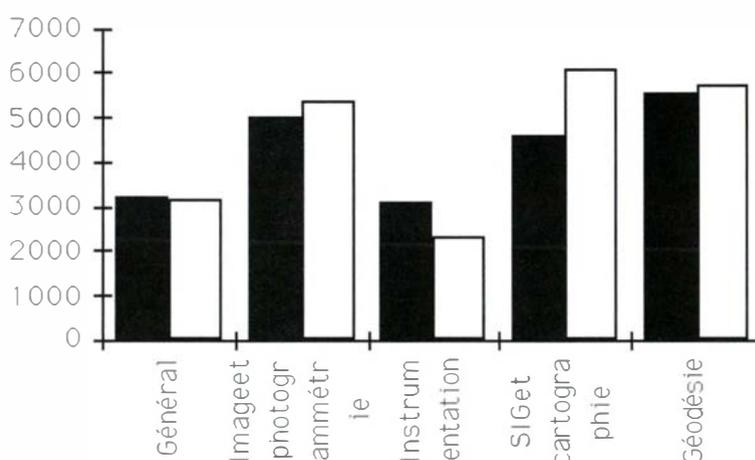
On peut aussi noter par rapport aux années antérieures, un ralentissement de la proportion des départs (sur 1992 par rapport à 1991, nombre identique mais sur un effectif plus élevé).

Enfin, la proportion d'IG, trop élevée en 1991, a fortement décru (de 40% début 1991 à 20% début 1993), et l'affectation d'Ingénieurs Géographes à la Recherche redevient souhaitable.

## 1.2 RÉPARTITION DES DÉPENSES

Globalement, le budget Recherche 1992 de l'IGN s'élevait à 23 MF<sup>1</sup> environ, en augmentation de 28% par rapport à 1991. Cette somme provient d'une part du Ministère de la Recherche (soutien de programmes = 3,8 MF, équipement = 5,4 MF) et du Ministère de l'Équipement pour la différence.

Les dépenses dépassent 95% des sommes prévues; l'activité réelle atteint donc maintenant retards dans les affectations de personnels par rapport aux prévisions.

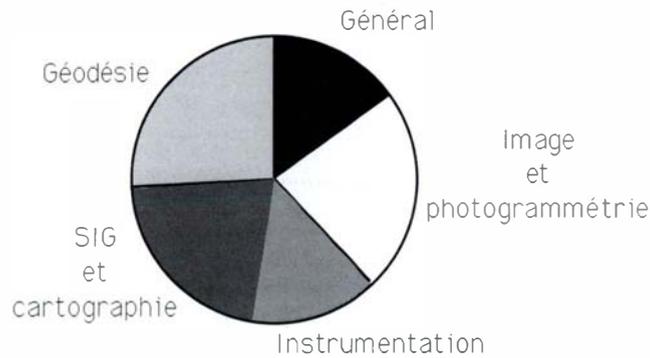


Comparaison des dépenses par domaines réalisé / prévu  
(noir=réalisé, blanc=prévu)

Cette conformité globale des prévisions par rapport aux réalisations, cache des changements un peu plus importants dans le détail par thèmes. Les dépenses ont été plus élevées que prévues en instrumentation, en particulier à cause de difficultés pour la caméra numérique (voir § 3.1) et inversement, le thème SIG et cartographie a dépensé un peu moins que prévu, en particulier à cause de prise en compte de financements externes intervenus en cours d'année sur des sujets initialement prévus dans le financement Recherche (voir § 1.4).

<sup>1</sup> Tous les coûts figurant dans cette partie correspondent à des coûts complets.

Les chiffres de dépenses proviennent de la comptabilité analytique et ne pourront être considérés comme définitifs qu'après la clôture de l'exercice comptable.



Répartition des dépenses par domaines (réalisé) \*

Par rapport aux années précédentes, les volumes relatifs par thèmes montrent une diminution des dépenses d'ordre général (congrès, publications, soutien et participation aux associations scientifiques, gestion de la Recherche et des Développements), qui n'est en fait qu'une stabilisation des coûts dans un budget en croissance, et une augmentation du volume en instrumentation et en photogrammétrie numérique.

### 1.3 BILAN DU PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT

Les Développements sont explicitement séparés de la Recherche, et il n'entre pas dans les objectifs de ce bilan de Recherche de faire un compte-rendu technique des activités de développement. L'essentiel de l'activité se déroule sous la forme de projets au sein des Services de Production.

Le programme de Développement est financé sur dotation du Ministère de l'Équipement et partiellement sur fonds propres. Le budget initial, stable par rapport à 1991, s'élevait à 27 MF environ, mais les prévisions de dépenses, établies en début d'année au vu des demandes, n'étaient que de 24 MF. Le temps a confirmé cette tendance à la diminution des développements puisque 17 MF seulement sont dépensés (71% des prévisions). Cette écart entre le prévu et le réalisé s'accompagne malheureusement d'une dérive dans le temps (retards dans les résultats, développements reconduits à l'année prochaine). Par ailleurs, et en contradiction avec la Charte des Projets, un certain nombre de développements ont eu lieu hors contrôle de la Direction Technique et ne sont pas imputés sur le budget de Développement (BDCarto en particulier); d'autres erreurs d'imputations notables ont eu lieu (projets CIEvol et GPS), si bien qu'il faut tempérer l'importance de la diminution de l'effort de Développement, sans que l'on puisse avancer de chiffres fiables.

Un travail important a été fait cette année pour améliorer le fonctionnement par projet en tirant partie des trois années d'expérience de cette forme de conduite des développements. Une version 2 de la Charte des Projets a été rédigée conjointement par DT/GOM et le Service de la Recherche.

Parmi les dysfonctionnements constatés auxquels on tente progressivement de remédier, on peut citer l'importante dérive des projets (en moyenne d'un facteur 2 pouvant atteindre un facteur 4 en coûts comme en délais) et la difficulté à établir des protocoles formels de recette et de validation interne (des développements insuffisamment validés sont ainsi mis en production prématurément).

**Projets clos en 1992** : BDDocumentaires, BDTopoNymiques, GPS, Standardisation des supports, Mesure du flou sur les photographies aériennes.

**Projets lancés en 1992** : Ortho-photo numérique, Développement de la BDTopo, Mise à jour BDCarto.

**Projets commencés avant le 1/1/92 et non terminés au 1/1/93** : BDGéodésiques, BDRoutières, BDMillion, Bureau d'Études Cartographiques, Cartographie Spatiale, Edigéo, Remplacement du Sémio, Serveur Général.

## 1.4 BILAN DE RECHERCHE

### 1.4.1 Recherches sous contrats

La plupart des recherches sous contrats portent sur plusieurs années civiles. On ne mentionne ici que les contrats pour lesquels l'activité 1992 a été significative.

- Evaluation de MNT dans diverses configurations de rapport B/H pour HRG, financement CNES: 180 kF. Début en 1991. Achevé. Voir § 2.5.2.
- Visu3 pour Géospace, financement 380 kF. Début en 1991. Largement sous-traité. Terminé en 1992.
- Aérotrilatération laser pour Elf-Aquitaine, financement 240 kF. Début en 1991. Achevé pour cette phase. Deuxième contrat sur 1993. Voir § 3.1.
- Installation de codeurs numériques sur appareils de restitution ESGT, financement 40 kF. Début en 1992. Achevé.
- Projet ESPRIT "AMUSING", financement 530 kF. Début en 1992, prolongements sur les années suivantes. Voir § 4.1.2.
- **Geoql** - FLEXIMAGE, financement 150 kF. Début en 1992, prolongements sur 1993.
- Projet EUREKA GENEgis, financement 560 kF. Début en 1992, prolongements sur les années suivantes. Voir § 4.2.1
- Simulation d'images de Mars pour le CNES, financement 220 kF. Début en 1992. Pratiquement achevé.
- Expertise du fichier DCW, financement 470 kF. Début en 1991. Achevé.

Globalement l'activité 1992 sous contrats externes correspond à un volume de travaux faits de 1,7 MF et à un montant facturé de 1,2 MF (la différence correspond à des travaux partiellement réalisés, non encore facturés).

Le volume de ces activités sous contrats est en augmentation significative par rapport à l'année passée, au moins en terme de montant des commandes en cours (+70%).

### 1.4.2 Programme de recherche

Les quatre chapitres suivants font le bilan scientifique des diverses recherches menées au cours de l'année. Ces recherches ont principalement eu lieu au sein du Service de la Recherche (92 % en terme de coûts, ce qui est un bon indicateur de la répartition de l'activité); mais sont intégrées dans les thèmes qui s'y rattachent, les recherches menées dans d'autres unités de l'IGN (ENSG principalement).

Le **chapitre 2** est consacré aux recherches en photogrammétrie et imagerie numérique. L'axe principal concerne l'automatisation de la saisie des données sur image numérique, essentiellement dans le contexte de la saisie pour la Base de Données Topographiques (§ 2.1, 2.2, 2.3). Le deuxième aspect important concerne la définition et la mesure de la qualité des données numériques (§ 2.4). On retrouvera d'ailleurs cette même préoccupation, mais orientée sous son aspect gestion, dans le chapitre 4 (§ 4.1.3). Ces recherches sur la qualité des données s'inscrivent dans une démarche d'ensemble de l'IGN visant à mieux spécifier les produits et à mieux contrôler les processus, et sont une des composantes de la démarche qualité.

Le **chapitre 3** traite des mises au point instrumentales. L'action principale concerne la mise au point d'un prototype de caméra aérienne numérique (§ 3.1.1). La mise au point d'un tel appareil est en effet vraisemblablement une condition majeure de l'efficacité des méthodes d'aide à la restitution photogrammétrique. Elle s'inscrit donc dans une perspective globale de passage au numérique de l'ensemble de la chaîne d'acquisition et de diffusion des données géographiques. Le but qui est ici visé n'est pas de se substituer aux industriels constructeurs, mais de démontrer la faisabilité et l'utilité d'un tel instrument, de manière à accélérer l'apparition sur le marché de ce type d'instruments. La deuxième phase consistera à trouver des partenariats industriels pour la réalisation en mode opérationnel de cet instrument. En dehors de cette caméra dont la mise au point est en cours, on peut signaler la première mise en service de la station laser ultra-mobile (§ 3.1.2) dont la conception et la réalisation, bien que sortant un peu des missions prioritaires de l'IGN, constitue une prouesse technique et un bon exemple de partenariat de recherche.

Le **chapitre 4** comporte deux volets. Le premier concerne les problèmes spécifiques de gestion de bases de données localisées du type de celles que l'IGN constitue. En particulier, les recherches sur la modélisation (§ 4.1.1) se justifient par la difficulté de fusionner des bases de données construites sur des modèles différents, ce qui n'est actuellement pas envisagé, mais deviendra certainement indispensable dans les années qui viennent. D'une certaine manière, on peut considérer que ces recherches s'inscrivent dans la continuité de l'effort fait par l'IGN depuis plusieurs années (FEIV puis EDIGéO) pour normaliser les formats et les concepts de l'information géographique numérique de manière à favoriser les échanges entre utilisateurs. Les autres spécificités des BDgéographiques tiennent à la gestion de la précision (en particulier géométrique, mais aussi sur les aspects d'inter-relation entre les précisions sémantiques, d'exhaustivité et géométrique), au volume des données concernées qui posent des problèmes cruciaux de performances d'accès (§ 4.1.4), et aux problèmes de mise à jour des données (§ 4.1.5). Ce premier volet prend donc en compte des aspects assez généraux des SIG, et est lié au développement et à l'évolution future du Serveur Général de données localisées. Le deuxième volet est plus spécifiquement concerné par les utilisations cartographiques des bases de données, et donc par la généralisation cartographique. Le but est ici d'avancer dans une démarche d'automatisation de la phase de rédaction, phase qui est actuellement effectuée manuellement, et qui constitue une des phases lourdes du processus complet de fabrication des cartes. Actuellement, on ne s'intéresse qu'à la partie "dessin" de la généralisation, la partie généralisation au sens du modèle de données et de la légende, ne présente pas le même caractère d'urgence (elle n'est faite qu'une fois par type de carte), et pourra dans un avenir plus lointain être étudiée dans le prolongement des recherches sur les modèles objets (§ 4.1.2). Cette partie "dessin" est difficile à automatiser dans la mesure où elle met en oeuvre des connaissances que l'on peut qualifier d'expertes, mais qui ne forment pas un tout à la fois formalisé, cohérent et complet. L'approche "intelligence artificielle" qui est ici tentée, se justifie largement plus par la souplesse de maquettage qu'offrent les générateurs de systèmes experts que par un désir intellectuel d'exploiter une approche experte de conception de systèmes.

Dans le **chapitre 5**, l'axe de recherche majeur (§ 5.1) concerne l'étude et la contribution à l'établissement d'un système de référence mondial. Ces recherches doivent fournir la base scientifique pour l'établissement du RGF, dans sa dimension de rattachement à un repère mondial. On trouvera à la fois des recherches assez théoriques (§ 5.1.2 sur la théorie de la rotation de la Terre), et des recherches plus expérimentales à fortes implications internationales (§ 5.1.1 et § 5.1.3). Du point de vue de la motivation, on pourrait aussi rattacher à ce cadre les expériences sur les méthodes de positionnement (§ 5.3.1 et § 5.3.2). Les recherches mentionnées sous la rubrique "Géodésie pour les Sciences de la Terre" (§ 5.4) sont une forme de valorisation et d'approfondissement de l'expérience acquise sur les études de déformation de réseaux mondiaux, ou sur les développements instrumentaux.

# 2 - IMAGE ET PHOTOGRAMMÉTRIE

par Olivier JAMET

*L'essentiel du programme de Recherche 1992 porte sur l'aide à la saisie photogrammétrique de la Base de Données Topographique (§ 1 à 4). L'objectif de ces recherches est la mise au point d'outils d'analyse d'image permettant l'automatisation partielle des tâches de restitution. Les techniques développées interviennent aussi bien au niveau des opérations photogrammétriques simples (§ 1) que de la saisie des différents thèmes cartographiques contenus dans la base (§ 2 : orographie, § 3 : planimétrie).*

*Un second axe de recherche concerne l'évaluation de la qualité des données géographiques (§4).*

*Le dernier paragraphe regroupe les autres activités (lecture automatique des cartes scannées, études sur données satellitaires).*

## 2.1 PHOTOGRAMMÉTRIE

### 2.1.1 Orientation interne d'une photographie numérique

*par Philippe GUIAVARC'H*

#### 2.1.1.1 Contexte - Objectifs

La détermination de l'orientation interne d'une photographie aérienne consiste à positionner un repère tridimensionnel lié à la chambre de prise de vue ou au faisceau perspectif par rapport au support de la photographie. Cette opération correspond en pratique au pointé des marques de fond de chambre qui permettent d'orienter et de positionner la chambre de prise de vue par rapport au support d'acquisition. Ces pointés sont effectués manuellement sur les systèmes actuels. Les marques de fond de chambre étant représentés par des repères de forme constante sur une image, cette opération est automatisable sur des images numériques.

#### 2.1.1.2 Activité / Résultats

La méthode développée procède par corrélation automatique entre les différentes marques de fond de chambre. Une première marque est pointée interactivement, puis les autres sont déterminées automatiquement, le domaine de recherche étant limité par la connaissance approximative que l'on a de leur position (la rotation du film par rapport à la chambre est toujours faible; la dimension du film est connue).

La méthode se montre efficace, bien qu'actuellement, la précision de l'orientation interne soit entièrement dépendante de la précision du premier pointé.

#### 2.1.1.3 Prolongements envisagés

Une première amélioration devrait porter sur la fiabilité du premier pointé. Les marques de fond de chambre ont une forme géométrique qui doit permettre de recentrer le pointé utilisateur, et donc d'affiner le premier pointé. Ce contrôle pourrait être étendu à l'ensemble des marques déterminées et couplé à une procédure de corrélation croisée (redétermination du pointé initial par corrélation automatique avec les autres marques).

Une seconde amélioration pourrait consister dans l'automatisation complète du processus : la forme des marques de fond de chambre est constante pour l'ensemble des clichés utilisés par l'IGN, et la première marque pourrait être détectée automatiquement.

Ces développements ne sont toutefois pas jugés prioritaires pour l'IGN, dans la mesure où les constructeurs d'appareils de restitution numérique commencent déjà à proposer des utilitaires de ce type.

## 2.1.2 Mise en place relative de couples stéréoscopiques

par Philippe GUIAVARC'H

### 2.1.2.1 Contexte - Objectifs

La mise en place relative d'un couple stéréoscopique consiste à positionner les deux chambres de prises de vues l'une par rapport à l'autre, par détermination de points homologues sur les deux clichés. Sur les systèmes actuels, les pointés stéréoscopiques de points homologues sont effectués manuellement. L'objectif de cette action est l'automatisation de cette tâche, à l'aide de procédures utilisant la corrélation automatique. Au cours des études précédentes, un logiciel d'aide au pointé stéréoscopique a été développé, permettant à l'opérateur de choisir ses points homologues en monoscopie, le pointé stéréoscopique étant assuré par corrélation. Dans ce travail, on a cherché à automatiser la phase de choix des points elle-même.

### 2.1.2.2 Activité / Résultats

La méthode développée procède à une recherche de points homologues suivant un maillage régulier de la partie commune aux deux clichés. L'appariement est effectué par corrélation automatique, la valeur du coefficient de corrélation permettant un premier filtrage des fausses déterminations. Un second contrôle est effectué sur les résidus du calcul de la mise en place elle-même, qui permet d'éliminer les points aberrants.

La validation de la méthode n'a jusqu'à présent été effectuée que par contrôle des résidus obtenus et examen visuel de la répartition des points homologues sélectionnés. Les résultats semblent prometteurs. La méthode a été testée sur trois couples, à différentes échelles de prise de vue et différents pas de numérisation. Le tableau ci-dessous donne pour chaque couple testé le nombre de points initialement recherché, le nombre de points sélectionnés, la valeur de l'erreur moyenne quadratique et celle du résidu maximal.

Couple	Echelle	Numérisation	Npts initiaux	Npts validés	EMQ	Résidu max
Djibouti	1 : 4 500	200 $\mu$	90	70	12 $\mu$	25 $\mu$
Montpellier	1 : 8 000	20 $\mu$	200	-	-	-
Montpellier	1 : 8 000	40 $\mu$	200	55	5 $\mu$	9 $\mu$

Dans deux cas sur trois, les résidus quadratiques moyens sont inférieurs au dixième de pixel, avec une sélection assez sévère sur les résidus (seulement 25% des points conservés sur le second couple de Montpellier). Toutefois, le calcul n'a pas débouché sur une solution pour le premier couple testé sur la zone de Montpellier (indétermination après filtrage des points aberrants). La robustesse de la technique employée doit donc être confirmée. En particulier, le lien entre la résolution des images et le nombre de points validés doit être confirmé (lien entre la surface au sol des fenêtres de corrélation et la fiabilité des corrélations).

### 2.1.2.3 Prolongements envisagés

Plusieurs prolongements peuvent être envisagés :

- validation de la méthode : il convient de contrôler la fréquence des cas indéterminés, qui peut remettre en cause l'intérêt de la technique proposée; une approche multi-échelle (mise en place approchée à basse résolution) pourra être mise en oeuvre, la robustesse du calcul pouvant être liée à la surface au sol des fenêtres de corrélation; par ailleurs, un contrôle automatique de la répartition des points homologues déterminés devrait être mis en oeuvre,

- amélioration des déterminations de points homologues : les points homologues sont actuellement choisis suivant un échantillonnage systématique de la surface du cliché; des mesures de contraste local, peu coûteuses, pourraient guider le choix des points, suivant une méthode d'échantillonnage semi-régulière; par ailleurs, il semble possible de paramétrer la résolution de calcul (ou la taille des fenêtres de corrélation) en fonction de la taille des détails corrélés,

- amélioration du temps de calcul : une mise en place progressive des images, éventuellement à différentes résolutions successives, pourrait permettre de réduire les domaines de recherche des homologues (qui actuellement sont uniquement fonction d'une valeur approchée de la base et d'une estimation de la dénivelée maximale).

La méthode devrait se montrer assez rapidement opérationnelle. Si son automatisation complète n'est pas forcément souhaitable, elle pourra pour le moins permettre une densification aisée des points homologues, améliorant la mise en place relative, et facilitant en cela les calculs de corrélation (meilleure détermination des droites épipolaires). Un accord a été passé avec la Société MATRA / MS2i pour l'implantation de la méthode sur le Traster Numérique TION.

## **2.2 EXTRACTION DU RELIEF**

### **2.2.1 Amélioration du corrélateur DAUPHIN**

*par Patrick JULIEN*

#### **2.2.1.1 Contexte - Objectifs**

Le corrélateur DAUPHIN (Détermination AUTomatique de Points Homologues sur Images Numériques) est depuis plusieurs années opérationnel sur des couples stéréoscopiques d'images numériques à basse résolution (images SPOT en particulier). Son fonctionnement repose sur des hypothèses de continuité du terrain : la corrélation est calculée sur des fenêtres de taille variable, mais de forme fixe, symétriques par rapport au point examiné, et la validation des appariements est effectuée par contrôle de la cohérence du terrain sur un critère de pente maximale.

La corrélation de couples d'images à haute résolution (de l'ordre du mètre) pose de nouveaux problèmes, en particulier sur les superstructures en zone bâtie. Au bord des superstructures, la présence de parties cachées (visibles sur une seule image du couple) rend les mesures de ressemblance difficiles, et les contraintes de pente perdent leur sens.

L'objectif de cette action était l'étude des améliorations possibles du corrélateur, pour obtenir une meilleure restitution du relief vu en présence de discontinuités de la surface. A terme, ces améliorations permettront à la fois une meilleure interprétation automatique de ces superstructures, et leur élimination plus aisée pour une restitution de la surface topographique (courbes de niveau).

#### **2.2.1.2 Activité / Résultats**

Le corrélateur a été testé sur plusieurs couples stéréoscopiques :

- des stéréogrammes de synthèse à texture aléatoire,
- un stéréogramme SPOT sur le Népal,
- un stéréogramme de photographies aériennes à grande échelle (sur une centrale EDF).

Pour ce faire, les outils de visualisation nécessaires ont été développés, permettant un suivi interactif du déroulement de la corrélation (affichage des imagettes corrélées, de la fonction de corrélation...).

Le principe initialement testé a reposé sur l'élimination, dans le calcul du coefficient de corrélation entre fenêtres carrées définies sur les deux images du couple, des pixels de radiométrie trop dissemblables, par simple seuillage des différences radiométriques entre pixels correspondants. Cette méthode s'inspire de l'article [HERBIN 89]. On conçoit en effet, qu'avec cette méthode, la corrélation est moins perturbée sur un détail tel qu'un angle de toit, dont l'environnement est totalement différent sur les deux imagettes, du fait des parties cachées. L'efficacité de la méthode a été vérifiée en pratique.

Les essais successifs ont conduit à une amélioration de cette première méthode, en ne permettant que l'élimination de groupes de pixels proches les uns des autres dans la fenêtre de corrélation, complétant ainsi le critère de seuillage radiométrique d'un critère géométrique simple sur la forme des

dissemblances pouvant correspondre à des parties cachées. La restitution des discontinuités a été ainsi améliorée.

Cette étude a fait l'objet d'un stage d'élève ayant donné lieu à la publication interne d'un rapport [HIRSCHAUER 92].

### 2.2.1.3 Prolongements envisagés

Cette technique pourrait être employée systématiquement dans le corrélateur, pourvu qu'elle ne dégrade pas la qualité des résultats en zone dépourvue de superstructures. Des tests seront effectués dans ce sens en 1993.

La méthode de sélection des pixels à éliminer mérite par ailleurs d'être encore améliorée, soit au niveau du choix du seuil radiométrique, soit au niveau des contraintes géométriques à imposer à la forme du groupe de pixels éliminés.

Ces améliorations doivent être couplées à un autre axe d'évolution du corrélateur : des tests de corrélation itérative multi-échelle, avec rectification progressive des images, doivent également être abordés en 1993.

### 2.2.1.4 Références

[HERBIN 89] M. Herbin, A. Venot, JY. Devaux, E. Walter, JF. Lebruchec, L. Dubertret & JC. Roucharol : *Automated Registration of Dissimilar Images : Application to Medical Imagery*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 47, pp. 77-88 - 1989.

[HIRSCHAUER 92] V. Hirshauer : *Précision de Pointé d'un Corrélateur Automatique d'Images*, rapport de stage, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - septembre 92.

## 2.2.2 Parallélisation de la corrélation automatique

par Patrick JULIEN

### 2.2.2.1 Contexte - Objectif

Le **contexte** de cette action est la valorisation mutuelle d'un matériel et d'un logiciel développés dans deux organismes publics :

- le matériel est le calculateur parallèle prototype SYMPATI 2 du CEA,
- le logiciel est le corrélateur automatique d'images DAUPHIN de l'IGN.

L'**objectif** n'est pas fixé de façon rigide; on pourra le considérer atteint si l'une des trois actions suivantes est réalisée avec succès :

- dériver de DAUPHIN un algorithme parallèle adapté à l'architecture de SYMPATI 2, dans le but de diminuer le temps d'exécution,
- dériver de DAUPHIN un algorithme parallèle "universel" fonctionnant sur toute machine parallèle,
- définir un corrélateur meilleur que DAUPHIN fonctionnant sur machine parallèle.

Cette recherche est menée dans le cadre de la thèse de Christian MAZZONI, co-financée CEA-IGN, dans les locaux du CEA (Saclay, directeur scientifique : Hassan ESSAFI) et suivie à distance à l'IGN.

### 2.2.2.2 Activité / Résultats

La difficulté pour paralléliser DAUPHIN réside dans la contradiction suivante : une machine parallèle est d'autant plus efficace que tous les processeurs accomplissent la même tâche au même moment, tandis que le traitement appliqué par DAUPHIN à un pixel donné dépend de ce pixel; il ne saurait donc être question d'adopter un principe "un pixel = un processeur".

L'année 1992 a été consacrée par le thésard à :

- traduire DAUPHIN de FORTRAN en langage C,
- l'installer sur une machine séquentielle (SUN) au CEA afin de simuler des méthodes de parallélisation (dans l'attente du prototype SYMPATI),
- l'intégrer au système de traitement d'images et de développement-logiciel KHOROS,
- se former à l'utilisation de la machine SYMPATI 2,
- implanter un algorithme de corrélation plus sommaire que DAUPHIN : résultat décevant,
- modifier DAUPHIN : deux stratégies envisagées (non explicitées) ; les MNT obtenus étant forcément différents de celui fourni par le programme original, il faut départager. Sur des données réelles, il est impossible de savoir lequel a raison; on peut le savoir lorsqu'on traite un stéréogramme de synthèse,
- créer un stéréogramme de synthèse : la difficulté est de fabriquer une texture garantissant une probabilité faible de fausses corrélations,
- évaluer un nouveau langage haut niveau de programmation T++ (extension de C++) pour ordinateur à architecture parallèle : des spécifications indiquées à l'auteur du langage en ont résulté, en vue d'une adaptation optimale aux calculs de corrélation.

### 2.2.2.3 Prolongements envisagés

- Conclure sur les deux stratégies de modification de DAUPHIN évoquées plus haut,
- réfléchir à des modifications dans l'architecture de l'actuel SYMPATI 2,
- simuler la nouvelle architecture pour l'évaluer.

## 2.2.3 Démêlage de courbes de niveau

*par Patrick JULIEN*

### 2.2.3.1 Contexte - Objectifs

Sur les pentes très fortes, des courbes de niveau saisies indépendamment les unes des autres peuvent présenter des entrecroisements rendant leur exploitation difficile (tant au niveau de la lisibilité qu'au niveau des traitements numériques). En effet, au cours de la restitution de ces courbes, d'une part, le positionnement du ballonnet peut se montrer plus difficile s'il y a des parties cachées, et d'autre part, la position planimétrique théorique de plusieurs courbes peut être pratiquement la même, à une distance inférieure à la précision théorique du pointé.

C'est le cas de plusieurs lots de courbes de niveau saisis pour la BDTopo sur des restituteurs analogiques, sur des zones de montagne, pour lesquels la grande quantité d'erreurs de ce type rend une correction manuelle très lourde.

L'objectif de l'étude était la mise en oeuvre d'une solution automatique à ce problème.

### 2.2.3.2 Activité / Résultats

On s'est orienté vers une méthode simple dans son principe : on construit un MNT à partir des courbes de niveau, et on dérive de ce MNT de nouvelles courbes qui ne se coupent plus, puisqu'un MNT ne présente jamais de faces strictement verticales, et encore moins de surplombs.

L'outil pressenti pour construire le MNT est la "grille élastique", qui permet d'astreindre le MNT à bien s'ajuster sur les données sûres, et l'autorise à se démarquer des autres.

La difficulté est bien sûr d'extraire des courbes emmêlées des données sûres, et de chiffrer leur degré de sûreté sous la forme d'un poids à introduire dans les calculs.

Le problème ainsi formulé a été proposé comme sujet de stage. Le choix le plus satisfaisant parmi ceux essayés a été d'affecter à chaque noeud du MNT construit la moyenne des altitudes des courbes passant à proximité (dans un voisinage carré de la taille de la maille choisie pour le MNT). Le poids associé à cette estimation de l'altitude est fonction de la dispersion des altitudes : là où passent peu de courbes différentes, le poids est fort, considérant qu'alors la probabilité d'entrecroisement est faible; inversement, un poids faible est donné dans le cas contraire.

Ce choix n'est pas à l'abri de critiques :

- il arrive qu'il passe une seule courbe à côté d'un noeud, et qu'elle soit fautive,
- a contrario, il arrive que les courbes soient au départ correctes sur un flanc de barre rocheuse.

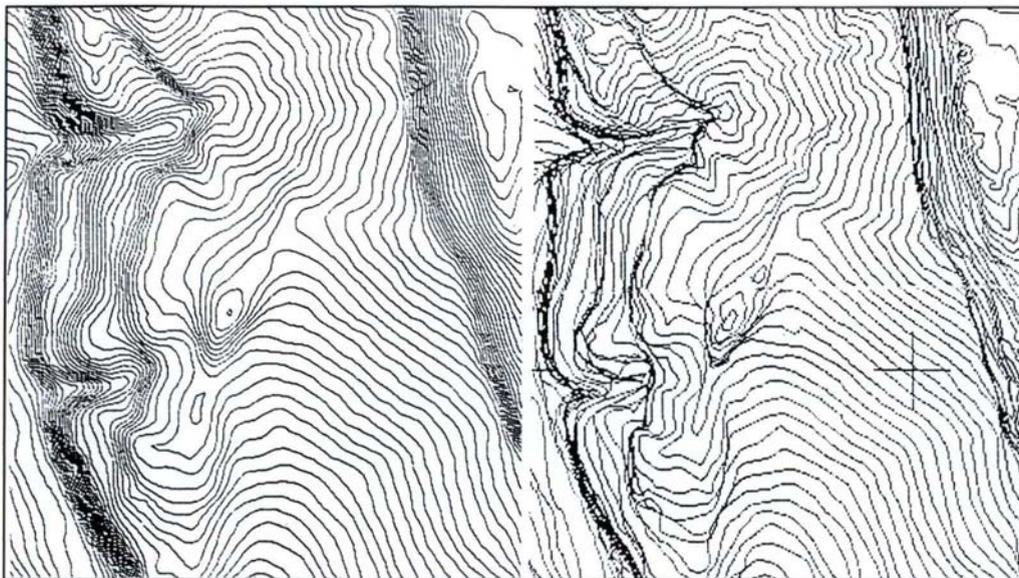


fig 1 : exemple de démêlage de courbes de niveau :  
à gauche, courbes démêlées; à droite, courbes initiales

Les résultats obtenus reflètent les qualités et les défauts de la méthode. Les courbes sont effectivement démêlées sur les zones fausses au départ et de façon assez satisfaisante; un lissage assez fort est appliqué, dégradant sans doute la précision initiale des données, mais la lisibilité est considérablement améliorée. Par contre, les zones initialement correctes sont également dégradées en précision, et en particulier les zones très pentues, ce qui ne peut pas être jugé satisfaisant.

Ce travail a été publié au sein d'un rapport de stage [MOREAU 92].

### 2.2.3.3 Prolongements envisagés

A court terme, la méthode peut être employée pour la correction des courbes, moyennant une sélection manuelle des zones à traiter, de façon à ne pas dégrader les zones correctes. Les résultats sont certainement perfectibles au niveau de la précision du rendu du terrain, mais la méthode présente déjà l'avantage d'être plus économique qu'une reprise manuelle des courbes.

A moyen terme, si l'application s'avère intéressante (les appareils de restitution actuels, permettant l'injection sur les images des vecteurs saisis pendant la restitution, éliminent complètement les erreurs de ce type), on peut affiner la méthode en prenant en compte les intersections entre courbes pour qualifier celles-ci (ce qui avait paru coûteux en première analyse), ou en utilisant des données exogènes (les zones de rocher, les points cotés...).

### 2.2.3.4 Références

[MOREAU 92] E. Moreau : *Application à la Cartographie des Modèles Numériques de Terrain, Calculés par la Méthode de la "Grille Elastique"*, rapport de Stage, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.

## 2.2.4 Généralisation de courbes de niveau

par Patrick JULIEN

### 2.2.4.1 Contexte - Objectifs

Cette étude s'inscrit dans la suite d'un essai réalisé en 1982 (P. JULIEN), qui consistait, au lieu de généraliser directement les courbes de niveau à généraliser la surface qu'elles définissent, c'est-à-dire un

MNT. L'idée étant que des courbes dérivant d'un MNT doivent être plus cohérentes que des courbes généralisées individuellement.

Le MNT avait été calculé par "grille élastique" avec des poids choisis de façon à fournir une surface lissée, donc généralisée.

Le résultat obtenu alors (planche de courbes à l'échelle du 1 : 100 000 sur la feuille d'Autun) avait été considéré utilisable par les cartographes [POLAKOWSKI 82]. Il subsistait toutefois des réserves :

- tendance à "adoucir et amollir le profil des versants",
- "défaillances dans le rendu des lignes de crête au niveau de la courbe terminale",
- "dans les zones à faible pente, fonds de thalwegs parfois équivoques, et qui s'arrondissent de façon exagérée".

L'étude conduite en 1992 avait pour but de remédier à ces défauts.

#### 2.2.4.2 Activité / Résultats

La méthode envisagée propose d'interdire le lissage du MNT le long des crêtes et des thalwegs. On supprime simplement pour cela les contraintes d'élasticité le long des lignes correspondantes, dans le calcul de la grille élastique réalisant le lissage.

La mise en oeuvre de la méthode a été confiée à un stagiaire qui a pris en charge les développements utiles à son évaluation :

- un outil de saisie interactive permettant la suppression manuelle des contraintes élastiques,
- un algorithme sommaire d'extraction automatique des crêtes et des thalwegs dans un MNT.

Des tests ont été effectués sur un MNT de synthèse pyramidal (avec saisie manuelle ou automatique des lignes de crête), puis sur un MNT issu de la Base de Données Altimétrique sur la région de Remiremont (Vosges). Les courbes généralisées à l'échelle du 1 : 100 000 par la méthode proposée ressemblent plus à une généralisation manuelle que celles issues de la méthode initiale sans lignes caractéristiques.

Ce travail a été publié au sein d'un rapport de stage [MOREAU 92].

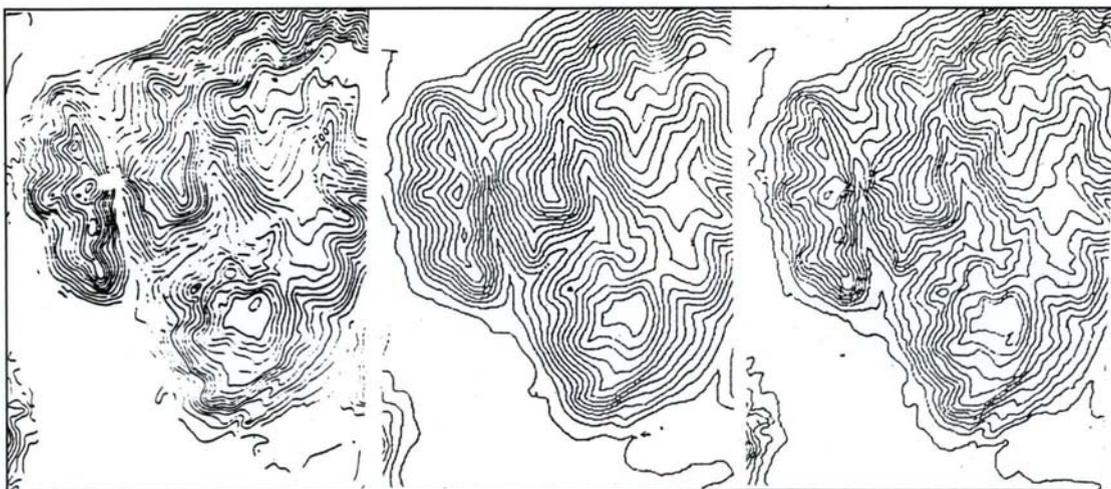


fig 1 : exemple de généralisation des courbes de niveau : à gauche, généralisation manuelle; au centre, généralisation automatique; à droite, courbes initiales

### 2.2.4.3 Prolongements envisagés

La méthode doit sans doute être validée de façon plus large. Par ailleurs, la généralisation des courbes de niveau ne peut pas toujours être réalisée entièrement indépendamment de la généralisation des autres couches d'information cartographique (hydrographie, réseau de communication...). Un sujet de thèse est donc proposé en 1993 dans le cadre du groupe "Système d'Information géographique", proposant l'étude plus complète des contraintes imposées par le relief sur la généralisation des autres thèmes, et réciproquement. Des tests de généralisation par la méthode ici proposée pourront être repris dans ce cadre.

Par ailleurs, des applications sont envisagées également en saisie initiale de la topographie. Le calcul de courbes de niveau à partir de MNT issus de corrélation automatique est généralement peu satisfaisant. Si le MNT n'est pas lissé, les courbes sont presque illisibles, révélant beaucoup trop de détails topographiquement non significatifs; et si on applique les lissages nécessaires, la précision s'en trouve dégradée sur les lignes caractéristiques du terrain. La méthode envisagée pour la généralisation semble pouvoir répondre à ces problèmes, permettant une meilleure utilisation de la corrélation automatique pour la production de courbes de niveau.

### 2.2.4.4 Références

- [MOREAU 92] E. Moreau : *Application à la Cartographie des Modèles Numériques de Terrain, Calculés par la Méthode de la "Grille Elastique"*, rapport de Stage, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.  
[POLAKOWSKI 82] R. Polakowski : Note interne SME/1528, IGN - 8 décembre 1982.

## 2.3 EXTRACTION DES THEMES PLANIMÉTRIQUES

### 2.3.1 Extraction du réseau routier sur photographies aériennes

par Sylvain AIRAULT

#### 2.3.1.1 Contexte - Objectifs

Cette recherche vise à automatiser la saisie photogrammétrique du réseau routier de la BDTopo. Les premiers résultats avaient montré que, s'il paraissait difficile d'obtenir rapidement une restitution entièrement automatique du réseau routier, il serait sans doute possible à moyen terme de disposer d'outils semi-automatiques de suivi de routes. Les tests ont été effectués en monoscopie à partir de photographies à l'échelle du 1 : 20 000 avec un pixel terrain de 40 cm. A cette résolution, les problèmes liés à la qualité géométrique (3-D) ne semblent pas insurmontables mais n'ont pas encore été abordés. Seuls les problèmes liés à la détection des routes figuraient parmi les objectifs.

Ces objectifs étaient les suivants :

Dans un premier temps, étudier une approche à partir d'une segmentation spécifique aux routes, sachant que, même si une segmentation ne peut suffire à la détection et à la restitution des routes, elle pourra par la suite être combinée avec d'autres méthodes.

Dans un deuxième temps, mettre en place un processus semi-automatique de saisie du réseau routier.

Les travaux effectués durant l'année 92 sont présentés dans le rapport de recherche [AIRAULT 92].

#### 2.3.1.2 Activité / Résultats

Deux voies ont été explorées successivement. La première consiste à exploiter le résultat d'une segmentation et à mettre en oeuvre principalement des critères de forme sur les régions élémentaires. La deuxième utilisant surtout les propriétés radiométriques des routes au sein d'un processus de suivi. Les critères mis en oeuvre reposent sur quelques connaissances simples sur le réseau routier :

- radiométrie : les routes sont caractérisées par une bonne homogénéité radiométrique le long de leur axe. Inversement, en bord de route, dans la direction orthogonale à l'axe, on doit trouver des différences radiométriques importantes,
- forme : les tronçons de routes ont une forme allongée, une largeur constante (bords parallèles) et à peu près connue (quelques mètres),
- connexité : il est rare de rencontrer des extrémités libres sur le réseau routier et il est exceptionnel de rencontrer des tronçons de routes isolés (en dehors de l'effet de fenêtrage de l'image),
- courbure : en dehors des carrefours, la courbure des routes est relativement faible et varie lentement.

- **Exploitation de la segmentation** : des tests de segmentation entrepris en 1991 avaient démontré qu'il paraissait illusoire, compte tenu de la complexité et de la diversité de l'information contenue dans une image aérienne, de penser obtenir une segmentation propre préservant les contours sur tous les thèmes étudiés (bâtiments, routes, forêts, hydro) et qu'il serait peut-être préférable de s'orienter vers des segmentations spécifiques, thème par thème, pour lesquelles les règles d'application des différents critères de fusion entre régions élémentaires seraient plus simples à définir.

Dans le cadre de la détection automatique des routes, une segmentation spécifique a été mise en oeuvre, basée sur l'homogénéité radiométrique des routes. On obtient en effet des résultats assez propres en effectuant une segmentation classique (par croissance de régions ou par détection de frontières) puis en fusionnant entre elles les régions élémentaires non homogènes.



fig 1 : Montpellier 512 x 512 avec segmentation

Les régions ainsi obtenues sont alors de taille suffisante pour pouvoir leur appliquer des critères de forme :

- taille,
- compacité,
- recherche de bords parallèles,
- largeur,
- recherche d'alignements.

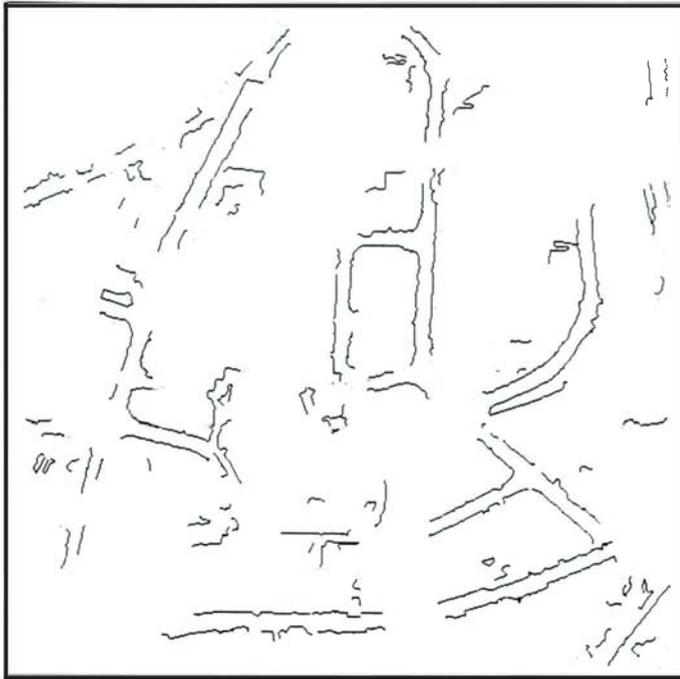


fig 2 : Montpellier 512 x 512  
Détection de bords parallèles



fig 3 : Montpellier 512 x 512  
Critères de forme appliqués à la détection des routes

La sélection des régions sur des critères de forme est faite par seuillage de mesures sur chacune des régions, examinées indépendamment les unes des autres. Il semble possible d'assurer plus de fiabilité au procédé en effectuant une sélection initiale plus contrainte, et en cherchant par la suite à propager vers les régions voisines (algorithme de type seuillage par hystérésis). La méthode aurait l'avantage d'utiliser des contraintes sur la connexité du réseau détecté.

- **Exploitation de l'homogénéité directionnelle des routes** : plusieurs voies ont été explorées. D'une part, des analyses globales de la radiométrie en tout point de l'image et d'autre part des algorithmes de suivi de routes à partir de points de départ, les deux options étant basées sur des calculs de variances sur des voisinages allongés caractérisant une direction, en explorant en chaque point un éventail de directions suffisant :

- opérateurs globaux : plusieurs opérateurs ont été testés, à différentes résolutions, et appliqués à des images brutes ou filtrées, tenant compte du fait que la variance doit être minimisée le long des axes de routes, et maximisée dans la direction orthogonale. Ces opérateurs simples donnent de bons résultats mais, n'utilisant pas toutes les connaissances que l'on a des routes, ne sont pas parfaitement fiables. Ils fournissent de bonnes indications sur les paramètres et les seuils à utiliser en suivi. Ils peuvent sans doute également être utilisés pour la détection automatique de points de départ pour le suivi.



fig 4 : Montpellier 512 x 512. Variances sur un voisinage de 20 pixels. Minimum sur 12 directions.

- opérateur local de suivi de route : le choix d'un algorithme de suivi de routes découle de l'avantage de pouvoir s'orienter, en fonction des résultats, vers deux types d'applications différentes :

- utilisé tel quel, le suivi peut être intégré à un processus de saisie interactive assistée,
- combiné à un algorithme de recherche de points de départ, il peut déboucher sur une extraction automatique du réseau routier.

La figure 4 montre que le seul critère d'homogénéité sur des voisinages linéaires est déjà très discriminant pour la détection des routes "propres", d'où l'idée de choisir ce critère comme critère de base pour la propagation le long des routes et de lui adjoindre petit à petit d'autres contraintes.

Un algorithme de suivi a été mis au point avec les caractéristiques suivantes :

- *contrainte sur la radiométrie* : des calculs de variances sont effectués dans les directions de propagation possibles sur des voisinages linéaires de longueur et de largeur variables. Le nouveau point retenu est fonction de la variance que l'on cherche à minimiser et de la distance parcourue que l'on cherche à maximiser. La radiométrie moyenne à partir de laquelle les écarts sont calculés est une donnée du suivi et ses variations sont limitées, ce qui permet de contrôler les franchissements entre deux régions homogènes de radiométries différentes.

- *optimisation de la propagation* : dans les cas complexes, on explore, avant de retenir un point, les possibilités futures de propagation en construisant un arbre des chemins possibles basé sur la

conservation à chaque pas des trois meilleures directions. Cela permet de fiabiliser le suivi et de franchir de fortes courbures ou des obstacles (changement de revêtement, arbre...).



fig 5 : Valréas 120 x 80 : arbre des chemins possibles

- *contrainte sur la trajectoire* : en fonction des points déjà détectés, on définit des directions possibles pour la propagation en associant un poids plus fort à la direction la plus probable. Un tour complet est échantillonné sur 32 directions, la direction de propagation est une donnée du suivi et chaque nouveau pas a une liberté angulaire de - 4 à + 4 unités de direction, c'est-à-dire de - 45 à + 45 degrés. En effet, si la majorité des routes ne nécessitent pas une telle liberté angulaire, il faut au moins prévoir de pouvoir franchir occasionnellement des angles droits, dans les zones urbaines notamment. Ils peuvent donc ici être franchis en deux sauts. Entre ces deux bornes, un poids fort est associé aux directions les plus probables, la ligne droite étant pour l'instant choisie comme direction préférentielle. On peut cependant envisager dans l'avenir d'extrapoler la direction probable en fonction de la courbure sur les derniers points.

- *contrainte sur le profil radiométrique et la largeur de route* : on peut s'attendre, en effectuant une étude du profil radiométrique dans la direction orthogonale à la direction de propagation, à trouver deux pics ou deux points d'inflexion correspondant aux bords de la route. Dans la pratique, la variété des profils rencontrés et les ambiguïtés qui en résultent pour extraire les bords ne permettent pas d'utiliser ce critère comme condition essentielle du suivi. L'étude du profil n'intervient donc que pour assurer un recalage géométrique de l'axe de la route aux endroits où il est suffisamment facile à interpréter.

- *rattachement au réseau routier* : tout nouveau point détecté fait l'objet d'une tentative de raccordement au reste du réseau. On obtient ainsi une représentation topologique correcte des carrefours, même si leur représentation géométrique est loin d'être parfaite, puisqu'elle dépend grandement de l'ordre dans lequel les routes sont saisies.

### 2.3.1.3 Prolongements envisagés

#### - Amélioration de l'algorithme de suivi :

Certains critères de décision ont déjà été étudiés mais les règles d'application de ces différents critères ne sont pas fixées. D'autre part il est prévu, dans le cadre d'un échange avec le laboratoire de

photogrammétrie et de télédétection de l'université de Delft (NL), d'étudier l'algorithme de suivi de routes développé là-bas [DE GUNST 91], de comparer les performances des deux approches - celle de Delft et celle du COGIT - et de mettre en évidence les qualités et les faiblesses de chacune, de façon à définir une méthode utilisant conjointement tous les critères de décision.

Un des moyens envisageables pour fiabiliser le suivi serait de reconnaître les "obstacles radiométriques" rencontrés le long des routes. En effet, un changement brutal de la radiométrie ou l'apparition de texture sont perçus comme des obstacles potentiels et sont pour l'instant des conditions d'arrêt. Le fait d'arriver à interpréter ces obstacles permettrait, d'une part, d'assurer le suivi à travers ces perturbations radiométriques et, d'autre part, d'utiliser l'information contextuelle pour confirmer l'existence de la route. Par exemple, la reconnaissance de véhicules laisserait raisonnablement penser que l'on est bien sur une route. Parmi les "objets" qui apparaissent comme des obstacles le long des routes, on peut espérer interpréter sur image : les véhicules, les ombres portées des bâtiments, les arbres isolés, le marquage au sol ....

- **Aspects géométriques** : lissage des données issues du suivi et approche 3-D.

Les données issues du suivi présentent des irrégularités qui exigeront un lissage pour leur donner une forme cartographique sans toutefois détériorer leur précision. La décomposition du tracé en une succession de segments de droites et d'arcs de cercles devrait déjà fournir d'assez bons résultats mais peut-être faudra-t-il passer par une modélisation plus complexe. Outre l'aspect représentation cartographique du tracé, les problèmes liés au positionnement de l'axe de la route devront également être pris en compte, sans doute par l'attribution de poids forts à des points que le suivi aura déterminé avec des critères d'évaluation optimaux ou par un retour dans l'image. Cette étude devra également intégrer l'approche 3-D en ajoutant aux procédures de lissage un MNT et/ou le recours à un suivi en parallèle sur les deux images. La méthode la plus simple à mettre en oeuvre est de réaliser comme actuellement le suivi 2-D sur l'une des images du couple et de récupérer l'information altimétrique par l'intermédiaire d'un MNT. Cette méthode présente l'inconvénient d'être liée à la qualité du MNT (qui présentera toujours des irrégularités locales) et de n'offrir aucun moyen de contrôle. L'autre méthode envisagée serait de réaliser un suivi en parallèle sur les deux images avec un suivi "maître" et un suivi "esclave", c'est-à-dire que le domaine de recherche dans la deuxième image serait réduit par des contraintes de pente liées à la route. Cette méthode aurait l'avantage d'exploiter l'information radiométrique des deux images, de poser des contraintes sur le relief spécifiques aux routes, et de permettre une comparaison a posteriori avec le MNT.

- **Etude d'un processus opérationnel de saisie semi-automatique** : cette étude doit prendre en compte tous les aspects de la conception d'un outil de saisie semi-automatique du réseau routier pour la BDTopo à partir de l'algorithme de suivi automatique. Ce travail comprend notamment :

- la conception d'outils de comparaison entre les résultats obtenus et une référence BDTopo (précision géométrique, forme des objets, exhaustivité),
- l'évaluation des résultats de la comparaison,
- l'analyse des solutions envisageables pour intégrer le suivi automatique au sein d'un processus interactif,
- l'évaluation des rendements actuels et des rendements que l'on peut attendre d'une saisie semi-automatique,
- l'influence de la résolution des images sur les résultats obtenus.

#### 2.3.1.4 Références

- [AIRAULT 92] S. Airault : *Extraction automatique du réseau routier*, rapport de recherche, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - décembre 1992.
- [DE GUNST 91] ME. De Gunst : *Automatic extraction of roads from SPOT images*, Lab. of Photogrammetry & Remote Sensing, Delft (NL), University of Technology - septembre 1991.

## 2.3.2 Restitution automatique des bâtiments sur couple stéréoscopique de photographies aériennes

par Tuan DANG

### 2.3.2.1 Contexte - Objectifs

Cette recherche a été entreprise en 1991 dans le cadre d'une thèse de l'ENST (direction Henri MAITRE), financée par l'IGN. Elle fait suite à des travaux effectués précédemment à l'ENST [LUO]. La méthode d'extraction du relief développée à l'ENST propose l'utilisation conjointe d'une corrélation automatique délivrant un semi dense de points homologues, et d'une segmentation, sur les régions de laquelle le relief est interpolé par des fonctions mathématiques (plans, quadriques). La thèse entreprise à l'IGN propose de compléter cette approche par des techniques d'interprétation, permettant l'identification des bâtiments et leur description par des primitives géométriques en trois dimensions.

La thèse se limite à l'étude de bâtiments isolés. Son objectif est la reconnaissance des bâtiments sur des critères géométriques (bords parallèles, angles droits...), permettant de leur appliquer des traitements spécifiques pour extraire leur géométrie 3-D. Ces traitements, correspondant à la phase de restitution, comprennent d'une part les méthodes de l'ENST pour l'interpolation et le lissage des parallaxes entre images gauche et droite, et d'autre part des traitements de filtrage du bruit suivant un modèle géométrique a priori (faces latérales verticales, bords réguliers, angles droits...).

### 2.3.2.2 Activité / Résultats

L'étude a jusqu'à présent été conduite sur un couple stéréoscopique test à environ 1 m de résolution au sol (centrale EDF du Blayet). Deux axes ont été développés durant l'année 1992.

- Géométrie 3-D de la scène

Le premier concerne l'extraction de la géométrie tridimensionnelle de la scène. Les travaux de l'ENST ont été repris et implantés sur le site de l'IGN, incluant :

- la corrélation automatique : le corrélateur disponible à l'IGN s'est montré mal adapté à la mise en correspondance d'images de bâtiments. Il procède par calcul de coefficients de corrélation sur des voisinages carrés, et se montre sensible aux ruptures de pente sur les arêtes de bâtiment, et au manque de contraste sur les toitures. Des améliorations ont donc été apportées, en utilisant une détection de contours pour contrôler la corrélation (mise en correspondance de points de contour et contrôle de la régularité de la pente le long des contours détectés,

- la segmentation automatique de l'image : deux algorithmes de segmentation ont été implantés. Le premier procède par recherche des bassins-versants dans un gradient [FAIRFIELD 90], et le second par croissance de régions [SUK 83]. La méthode de SUK semble actuellement la plus adaptée aux images traitées,

- l'interpolation des parallaxes : l'étude s'est pour l'instant limitée au modèle plan, qui doit se montrer suffisant pour les applications de l'IGN. Les parallaxes sont interpolées sur chaque région de la segmentation par moindres carrés, le test de validation du plan calculé portant sur les résidus de calcul. La méthode se montre sensible aux erreurs de corrélation et aux erreurs de segmentation. Un traitement spécifique des plans horizontaux a été mise en oeuvre par calcul du plan médian sur les parallaxes issues de corrélation.

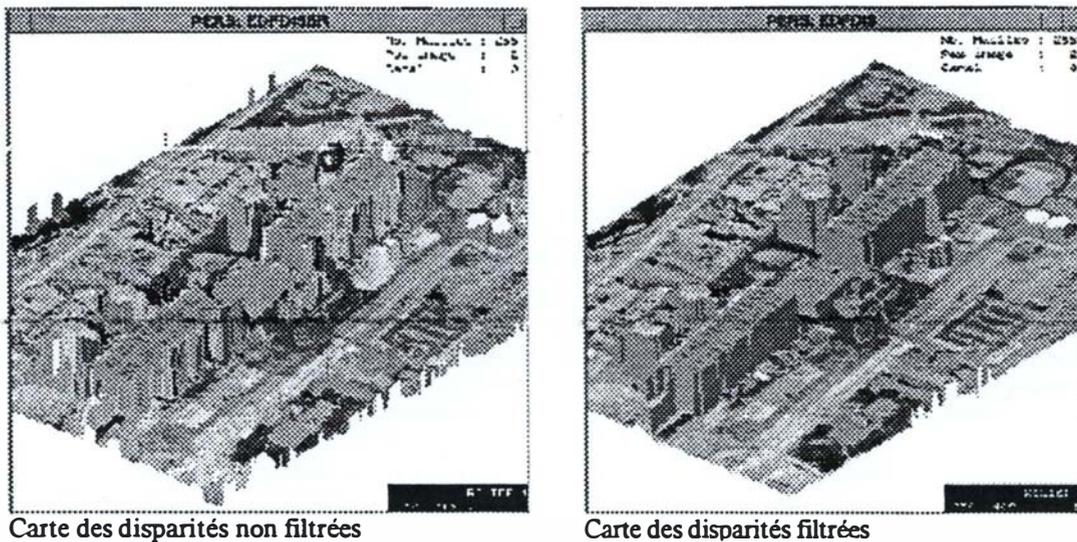


fig.1 : vue perspective illustrant l'application des modèles de surface aux parallaxes issues de la corrélation automatique du couple : à gauche, parallaxes d'origine ; à droite, parallaxes lissées (centrale EDF du Blayet)

Les résultats obtenus sont conformes aux conclusions des travaux de LUO [LUO 91, MAITRE 92].

- Interprétation des bâtiments

Le second axe s'est attaché à la détection des éléments permettant l'interprétation des structures de bâti. Des opérateurs de bas-niveau utiles à l'interprétation ont été implantés et testés (détection des angles sur contours extraits sur un gradient de CANNY-DERICHE [DANG 91], détection des ombres...). Ces détections seront intégrées au processus pour valider les traitements géométriques effectués. La caractérisation des formes géométriques reconnaissables sur la segmentation a par ailleurs été entreprise, la première étape consistant à détecter les alignements.

### 2.3.2.3 Prolongements envisagés

L'année 1993 sera principalement consacrée à la modélisation géométrique des bâtiments. Les opérateurs d'analyse de la segmentation en cours de développement doivent conduire dans un premier temps à la description des bâtiments par des primitives géométriques surfaciques (polygones réguliers, disques...). Ces primitives seront utilisées en 2-D pour filtrer le bruit de segmentation et améliorer la fiabilité d'interpolation des parallaxes, puis en 3-D, après calcul photogrammétrique des altitudes, pour permettre une description du bâti par des primitives polyédriques. Cette dernière phase (reconstruction 3-D) intégrera également des éléments de modélisation (verticalité des faces latérales...).

La cohérence géométrique de l'ensemble extrait doit suffire à valider le traitement. Un retour à l'information image initiale n'est toutefois pas exclu, soit en analysant la cohérence des détections de bas niveau (ombres en particulier) avec la géométrie 3-D proposée, soit par contrôle des correspondances radiométriques entre images gauches et droites, suivant le modèle 3-D proposé.

Les possibilités opérationnelles de la méthodes seront par ailleurs évaluées, en particulier pour la saisie de la Base de Données Topographique. Une comparaison des restitutions calculées par cette méthode avec des restitutions manuelles de la BDTopo sera effectuée au cours de la thèse (fin 1993 - début 1994).

### 2.3.2.4 Références

- [DANG 91] T. Dang : *Détection de Contours par Filtrage Optimal de CANNY-DERICHE*, rapport interne, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - novembre 1991.
- [FAIRFIELD 90] J. Fairfield : *Tobogan Contrast Enhancement for Contrast Segmentation*, 10th Int. Cong. Pattern Recognition, Atlantic City, Actes IAPR, pp. 712-716 - juin 1990.
- [LUO 91] W. Luo : *Utilisation des Modèles de Surface pour la Stéréovision*, thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications - 1991.
- [MAITRE 92] H. Maître & W. Luo : *Using Models to Improve Stereo Reconstruction*, IEEE-PAMI, vol. 14, n° 2, pp. 269-277 - février 1992.
- [SUK 83] M. Suk & SM. Chung : *A New Image Segmentation Technique Based on Partition Mode Test*, Pattern Recognition, vol. 16, n° 5, pp. 469-480, 1983.

## 2.3.3 Extraction du réseau hydrographique sur MNT

par Yanli QIAN

### 2.3.3.1 Contexte - Objectifs

Cette recherche, qui fait l'objet d'une thèse de l'université PARIS V entreprise en octobre 1992, dirigée par Georges STAMON (EHEI), s'inscrit dans le prolongement d'une étude sur la cohérence entre la Base de Données Altimétrique (BDAlti) et le contenu dans la Base de Données Cartographique (BDCarto).

L'extraction des thalwegs sur MNT a fait l'objet de nombreuses études antérieures. Les méthodes les plus efficaces procèdent par modélisation des écoulements sur le MNT. L'objectif de l'étude se limitait à une comparaison entre les réseaux extraits automatiquement par des algorithmes connus et le réseau hydrographique de la BDCarto, numérisé à partir de cartes à l'échelle du 1 : 50 000.

La thèse entreprise au mois d'octobre a pour but l'extraction semi-automatique du réseau hydrographique, en trois dimensions, et avec une précision métrique, compatible avec les spécifications de la base de données topographique (BDTopo). Les méthodes envisagées doivent combiner une extraction sur MNT par des algorithmes analogues à ceux évoqués plus haut, et des outils d'analyse d'image permettant de compléter le réseau dans les zones plates (indéterminées sur le MNT).

### 2.3.3.2 Activité / Résultats

#### • Cohérence entre un réseau hydrographique et un MNT

Deux types d'algorithme d'extraction ont été testés. Le premier est issu des développements de S. RIAZANOFF [RIAZANOFF 92, CHOROWICZ 92], et procède par détection automatique des cols dans le MNT, puis écoulement le long des plus grandes pentes à l'issue des cols. Le second a été développé par H. LE MEN dans le cadre de l'étude, et procède par modélisation de l'écoulement sur l'ensemble du MNT. Ces algorithmes ont été mis en oeuvre sur un MNT à pas de 40 m.

La comparaison avec le réseau hydrographique de la BDCarto s'est avérée plus aisée avec les données issues de l'algorithme de LE MEN, moins sensible au bruit, en particulier dans les zones plates. Des algorithmes d'appariement de réseaux arborescents ont été développés. Un premier rapport, faisant état des algorithmes utilisés, et de premiers résultats qualitatifs, a été publié [LE ROUX 92]. Les résultats complets de cette étude sont en cours de publication.

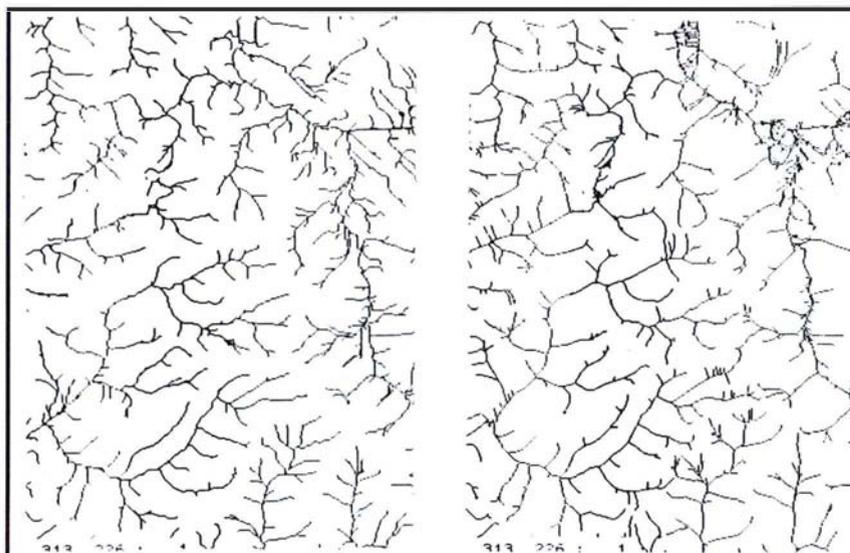


fig 1 : comparaison de deux extractions automatiques des thalwegs dans un MNT : à droite, algorithme de RIAZANOFF; à gauche, algorithme de LE MEN (Remiremont, Vosges)

- Saisie photogrammétrique du réseau hydrographique

Le travail effectué en 1992 a pour l'essentiel porté sur des tests des algorithmes existants. Ces algorithmes ont été mis en oeuvre sur des MNT à haute résolution (pas d'échantillonnage inférieur à 5 m) obtenus par corrélation automatique de photographies aériennes, et comparés visuellement à la saisie BDTopo correspondante (saisie photogrammétrique manuelle sur couple de photographies à l'échelle du 1 : 30 000).

A ces résolutions, les méthodes automatiques d'extraction se montrent très sensibles au bruit (les résultats variant notablement suivant les traitements de lissage appliqués aux données d'entrée). La saisie manuelle, qui constitue notre référence pour évaluer le processus, semble elle-même comporter une grande part d'interprétation, ne couvrant pas l'ensemble du réseau de thalwegs visible sur le relief.

### 2.3.3.3 Prolongements envisagés

Les prolongements envisagés en 1993 seront abordés dans le cadre de la thèse sur l'extraction du réseau hydrographique de la BDTopo.

Les algorithmes de détection sur MNT doivent être améliorés. La méthode a priori la plus féconde semble s'inscrire dans la continuité des travaux de LE MEN, procédant par calcul d'écoulement sur l'ensemble du relief. Il n'est cependant pas certain qu'elle se montre opératoire aux résolutions visées (métriques), et une approche multi-échelle est envisagée.

Parallèlement, la variabilité de la saisie manuelle doit être étudiée, afin de pouvoir déterminer si les algorithmes d'extraction sur MNT répondent aux spécifications attendues.

### 2.3.3.4 Références

- [CHOROWICZ 92] J. Chorowicz, C. Ichoku, S. Riazanoff, K. Youn-Jong & B. Cervelle : *A Combined Algorithm for Automated Drainage Network Extraction*, Water Resources Research, vol. 28, n° 5, pp. 1293-1302 - mai 1992.
- [LE ROUX 92] D. Le Roux : *Contrôle de la Cohérence d'un Réseau Hydrographique avec un Modèle Numérique de Terrain*, rapport de stage, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.
- [RIAZANOFF] S. Riazanoff, P. Julien, B. Cervelle & J. Chorowicz : *Extraction et Analyse Automatiques d'un Réseau Hiérarchisé de Thalwegs*, Int. J. Remote Sensing, vol. 13 - pp. 337-364, 1992.

## 2.3.4 Analyse de texture sur photographies aériennes

par Rémi JAYER

### 2.3.4.1 Contexte - Objectifs

L'aide à l'interprétation des photographies aériennes numérisées à des résolutions de l'ordre du mètre est rendu difficile par la quantité d'informations contenue dans les images. Leur forte texturation, dans les zones de végétation en particulier, limite l'application des procédures de segmentations jusqu'à présent étudiées à l'IGN (reposant soit sur l'examen des discontinuités radiométriques, soit sur des critères simples d'homogénéité radiométrique). L'emploi de méthodes de reconnaissance des textures semble indispensable pour l'interprétation de tous les thèmes liés à la couverture naturelle (forêts, vignes, vergers...).

Le travail effectué en 1992 fait suite à une courte étude conduite l'année précédente sur la reconnaissance des forêts [VAUJOUR 91]. Des opérateurs simples de reconnaissance avaient été mis en oeuvre, et s'étaient montrés efficaces sur le site étudié. Ils présentent toutefois deux défauts :

- les zones bâties ne sont pas distinguées des zones boisées,
- ils se sont montrés sensibles au type de couvert végétal (inefficaces sur d'autres sites).

L'étude a donc été reprise, avec pour objectif principal la reconnaissance de la végétation, et donne lieu depuis octobre à une thèse de l'université de Paris V, dirigée par A. GAGALOWICZ.

### 2.3.4.2 Activité / Résultats

Une méthode plus élaborée de reconnaissance de texture a été étudiée au cours d'un stage d'étudiant. Elle propose une caractérisation par des transformations linéaires locales, avec extraction de caractéristiques par lissage gaussien des composantes calculées [UNSER 89]. Son originalité réside surtout dans le calcul de caractéristiques réduites par approximation de la transformation assurant la discrimination théorique optimale.

Les résultats de l'étude se sont toutefois montrés d'un intérêt limité. Si la méthode de réduction des caractéristiques locales semble efficace (qualitativement meilleure qu'une réduction sur ACP), la faiblesse de la méthode réside dans l'étape de reconnaissance. Un processus de classification était proposé par UNSER, qui, s'il peut être adéquat pour un nombre réduit de textures, se montre inadapté dans le cas des images aériennes : les textures sont beaucoup trop variables pour pouvoir effectuer un apprentissage correct.

Ce travail a donné lieu à un rapport de stage [ELOUAFI 92].

Une démarche complémentaire a donc été entreprise dans le cadre d'une thèse, visant à implanter un algorithme de segmentation d'image par croissance de région plus adapté au problème (fondé sur une méthode par corrélation d'histogramme [SECCHI 90]), et à utiliser des descripteurs texturaux pour filtrer les résultats de segmentation.

### 2.3.4.3 Prolongements envisagés

L'étude se poursuit en 1993 dans le cadre de la thèse :

- implantation de l'algorithme de SECCHI dans le courant du premier trimestre,
- amélioration des résultats par coopération avec des algorithmes procédant par détection de contours et utilisation de données exogènes (réseau routier),
- caractérisation des régions de la segmentation par des indicateurs de textures.

### 2.3.4.4 Références

- [ELOUAFI 92] SM. Elouafi : *Etude de Paramètres de Texture pour la Segmentation des Photographies Aériennes Numérisées*, rapport de stage, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.
- [SECCHI 90] P. Secchi : *Segmentation d'Image et Fermeture des Contours par Corrélation d'Histogrammes Locaux : Application aux Images de Télédétection SPOT*, thèse de l'Université Paris 6 - juin 1990.
- [UNSER 89] M. Unser : *Multiresolution Feature Extraction and Selection for Texture Segmentation*, IEEE Trans. Mach. Intel., vol. 11, n° 7, pp. 717-728 - juillet 1989.
- [VAUJOUR 91] Vaujour et Chaderat : *Tests d'Outils pour la Détection de Forêts sur Images Aériennes*, Rapport de fin d'études Ecole Navale, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - 1991.

## 2.4 QUALITÉ DES DONNÉES

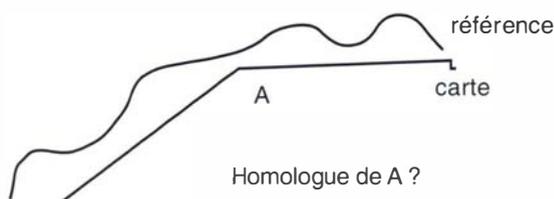
### 2.4.1 Contrôle du tracé planimétrique d'une carte - Contrôle ponctuel et contrôle linéaire

par Lyad ABBAS et Philippe HOTTIER

#### 2.4.1.1 Contexte-Objectifs

Dans le contexte de contrôle de qualité de la saisie de la base de données topographiques, plusieurs contrôles des levés photogrammétriques ont été réalisés les années passées. Ces contrôles ont été réalisés par la méthode du contrôle ponctuel qui consiste à comparer les coordonnées-carte de  $n$  points à leurs coordonnées "vraies", et après en avoir éliminé un certain nombre  $n'$ , à estimer l'emq par :

$$emq = \sqrt{\frac{1}{n - n'} \sum (e_{x_i}^2 + e_{y_i}^2)} \quad (\text{où } e_{x_i} \text{ et } e_{y_i} \text{ sont les erreurs en } x \text{ et } y).$$



La méthode du contrôle ponctuel a le mérite de la simplicité; mais elle a ses limites :

- elle devient impraticable quand la différence d'échelle entre carte et référence est trop grande: la notion de "point homologue" devient floue, voire disparaît,
- elle est difficilement praticable sur les objets sinueux et linéaires : routes, cours d'eau : les points "bien identifiables" deviennent rares et spéciaux,
- la proportion de points rejetés, un des facteurs essentiels pour l'appréciation de la qualité métrique, est fort difficile à interpréter. Quand on dit ainsi que 7% des points ont été rejetés, cela signifie-t-il que 7% de la carte soit "fausse"? Elle présente par ailleurs quelques pièges.

On peut recommander la démarche suivante pour les éviter :

- choix au hasard de  $n$  points ( $n > 100$ ) "bien identifiables" sur la carte (ou dans la base), et non sur la référence,
- recherche des points homologues sur la référence (le terrain s'il s'agit d'un contrôle terrain, une saisie à grande échelle s'il s'agit d'un contrôle photogrammétrique). On compte le nombre de points-carte sans homologues,
- détection "interne" et rejet des points "aberrants", avec 2 filtres :
  - un filtre grossier pour éliminer les fautes criantes,
  - un filtre plus fin où les tolérances sont calculées à partir d'estimations robustes de l'emq,
- estimation définitive de l'emq, qui ne doit être présentée qu'avec la taille  $n$  de l'échantillon et le nombre total  $n'$  de points rejetés,
- grille de systématisme 4 x 4.

L'idée de départ de la nouvelle méthode fut d'utiliser un outil mathématique classique : la distance de HAUSDORFF de deux ensembles (ici, des suites de segments). Quand certaines difficultés de calcul

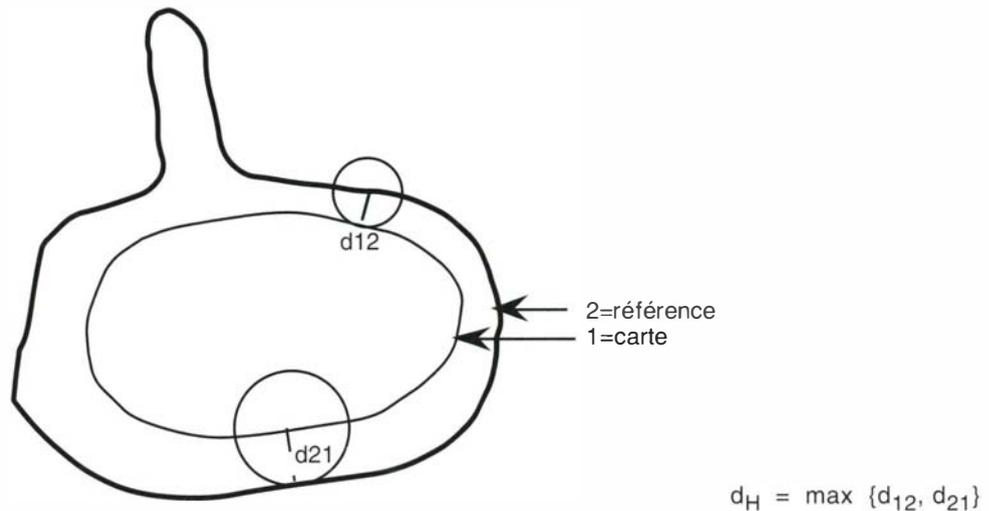
furent surmontées, on s'est aperçu que cet outil permettait, comme dans la méthode du contrôle ponctuel, d'estimer l'erreur moyenne quadratique planimétrique (emq plani).

Dans cette méthode, l'élément contrôlé n'est plus un point, mais le contour d'un objet; elle est donc plus générale, mais nécessite des logiciels assez délicats à mettre au point; il n'y a plus en principe de travaux terrain.

Cette étude a été menée dans le cadre d'une thèse à l'ENSG.

### 2.4.1.2 Méthode de contrôle linéaire

On juge de l'écart entre l'objet carte  $K_1$  et l'objet référence  $K_2$  par leur "distance de HAUSDORFF".

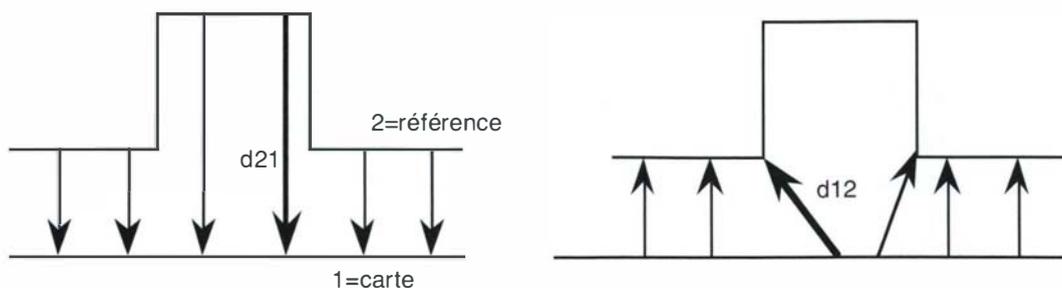


Si  $d_{12}$  est le max des plus courtes distances des points de  $K_1$  (carte) à  $K_2$  (référence),  $d_{21}$  celui des plus courtes distances des points de  $K_2$ , à  $K_1$ ,

$$d_H = \max \{d_{12}, d_{21}\} = \max \left( \max_{x \in K_1} (\min_{y \in K_2} d(x,y)), \max_{y \in K_2} (\min_{x \in K_1} d(x,y)) \right)$$

Pour le calcul de ces quantités, la méthode qui s'est avérée la plus pratique, consiste à faire circuler sur  $K_1$  une boule centrée à rayon variable qui touche  $K_1$ ; puis de même sur  $K_2$ .

A notre surprise, il est apparu, et d'abord dans les simulations, qu'en **moyenne**, on avait toujours  $d_{12} < d_{21}$  :



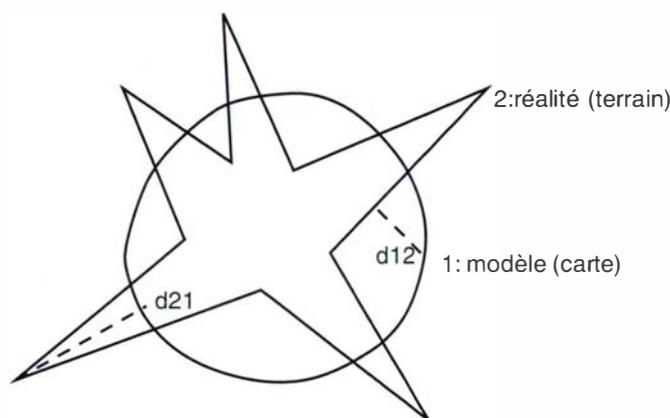
Par exemple, si on bruite les sommets d'un triangle fixe  $K_1$ , voisin d'un triangle équilatéral de côté  $L$ , pour simuler une emq planimétrique de 1,5 m, on obtient, en répétant les essais :

<i>L (côté moyen)</i>	<i>n (essais)</i>	<i>d<sub>12</sub> moyen</i>	<i>d<sub>21</sub> moyen</i>
1,5	300	0,98	1,30
3	400	1,02	1,42
6	400	1,26	1,44
15	600	1,90	1,43
37	400	1,28	1,43

Sur les échantillons réels (en tout cas les échantillons bruts, avant "purge"), on trouve une inégalité de même sens; l'explication en fait est très naturelle, presque triviale; lapidairement on peut dire :

- un bon modèle (ici la carte) est proche de la réalité (ici le terrain),
- la réalité est loin du modèle

et le schéma ci-dessous illustre suffisamment la formule pour qu'on se dispense ici d'autres explications :



Dans la pratique, la différence ( $d_{12} - d_{21}$ ) est évidemment moins grande que ne le laisse croire ce schéma (d'autant que le référencé est souvent "le nominal", c'est-à-dire selon une expression d'Isabelle VEILLET, le terrain "vu à travers les spécifications de la saisie") mais elle est souvent nette. Si on définit pour tout couple d'objets ( $K_1$  carte,  $K_2$  référence), son "indice de généralisation"

$$i = \frac{d_{21} - d_{12}}{(d_{21} + d_{12})/2} \quad \text{et si on en prend la moyenne } i \text{ sur un nombre}$$

suffisant de couples, on doit constater, si la référence est plus exacte que la carte et compte-tenu de la précision de  $i$  (malheureusement médiocre), qu'il est positif. Par exemple sur l'échantillon brut de Mulhouse centre-ville (190 objets),  $i = 0.120$ ; sur un échantillon de Montpellier (220 objets),  $i = 0.060$ .

Un inconvénient de la distance de HAUSDORFF est qu'elle varie de façon très nette avec la taille de l'objet, le nombre de segments définissant les contours, en bref avec sa complexité. La parade trouvée est très simple ; pour tout couple ( $K_1$ -carte,  $K_2$ -référence), on définit les trois "écarts-standard" :

$$e_{12} = d_{12}/d_{120} ; e_{21} = d_{21}/d_{210} ; e_H = d_H/d_{H0}$$

où  $d_{120}$  ( $d_{210}$ ,  $d_{H0}$ ) sont les moyennes de distances  $d_{12i}$  ( $d_{21i}$ ,  $d_{Hi}$ ), calculées par **simulation**, à partir d'emq a priori grossières :  $emq_{10}$  pour la carte,  $emq_{20}$  pour la référence. Il faut ici attirer l'attention sur la simulation proprement dite : elle doit toujours se faire à partir de l'objet **le plus simple** (l'objet carte  $K_1$ ) et après introduction sur ses plus longs côtés de points supplémentaires de façon à égaliser le nombre de sommets de  $K_2$ . Un bruitage avec l'emq a priori carte ( $emq_{10}$ ) donne alors l'objet référence simulé, et un bruitage avec l'emq a priori référence ( $emq_{20}$ ) l'objet carte simulé (noter l'inversion !).

Ceci étant, pour un couple d'objets ( $K_1, K_2$ ) on définit les **écarts-moyens-standard** :

$$ems_{12} = \frac{1}{2} \sqrt{(e_{12i})}; \text{ ems}_{21} \text{ et } ems_H \text{ analogues}$$

et on estime l'écart moyen quadratique carte-référence (l'erreur moyenne quadratique de la carte, si la référence est exacte) par  $emq = (ems_{12} + ems_{21} + ems_H)/3$ .

Si le rapport des emq a priori  $emq_{10}$  est  $emq_{20}$  n'est pas trop mauvais, une seule itération donne déjà des résultats acceptables. Dans la pratique il faut réitérer au moins une fois; on s'arrête quand les trois écart-moyens standard ne diffèrent pas significativement, et quand l'indice moyen réel de généralisation  $I$  ne diffère pas trop de l'indice simulé  $I_0$ .

La justification a été faite par simulation ; donnons ici un seul exemple : échantillon de 220 couples d'objets au 1 : 30 000, simulé à partir d'une saisie réelle au 1 : 30 000, avec les emq théoriques :  $emq_1 = 1.5$  m (carte);  $emq_2 = 0$  (référence).

La méthode du contrôle ponctuel a donné  $emq_P = 1,46$  m (écart-type 2 cm; 1800 points).

Avec les emq à priori  $emq_{10} = 1$  m et  $emq_{20} = 0$ , on trouve, à la première itération, par la méthode de contrôle linéaire :

$$ems_{12} = 1.37 (2); ems_{21} = 1.37 (1); em_H = 1.39 (2); I = 0.034 (17); I_0 = 0.024 (5)$$

En réitérant, avec  $emq_{10} = 1.40$  m et  $emq_{20} = 0$ , on a obtenu :

$$ems_{12} = 1.44 (3); ems_{21} = 1.42 (3); em_H = 1.41 (2); I = 0.034 (17); I_0 = 0.042 (7)$$

(le chiffre entre parenthèse est l' écart-type en cm).

L'emq sera alors estimée par 1.43 (3), (comparer à 1.46 (2) par la méthode du contrôle ponctuel).

Une dernière grave difficulté a obligé à repenser en profondeur le problème du contrôle linéaire. Il est apparu que dans la présentation des résultats finaux, il fallait finalement renoncer à la notion d'objet; en effet, plus ceux-ci sont complexes (c'est le cas en particulier pour les îlots urbains), plus la probabilité de trouver un désaccord local grave entre l'objet-carte et l'objet référence est grande; par exemple, sur le fichier brut de Mulhouse, 67 objets sur 190 sont déclarés hors-tolérance....

La formulation que nous proposons est alors celle-ci : l'exactitude du tracé d'une carte s'apprécie en donnant **simultanément** les quantités suivantes :

1 - l'estimation de l'emq planimétrique carte-référence : emq,

2 - le pourcentage P<sub>1</sub> de trait-carte en accord avec le trait-référence, ainsi que les pourcentages :

P<sub>11</sub> : ajouté ou hors tolérance (fautes),

P<sub>12</sub> : généralisation (spécifications de saisie), désaccord divers ( $1 - P_1 = P_{11} + P_{12}$ ).

3 - le pourcentage P<sub>2</sub> de trait-référence en accord avec le trait-carte, ainsi que :

P<sub>21</sub> : omis, ou restitué hors tolérance (fautes),

P<sub>22</sub> : généralisé, désaccord divers ( $1 - P_2 = P_{21} + P_{22}$ ).

C'est la méthode décrite plus haut, qui est employée ici pour estimer l'emq; mais elle doit être précédée et accompagnée d'une opération capitale : "la purge" des couples de contours ( $K_1, K_2$ ), opération absolument analogue à la détection et à la comptabilisation des points "aberrants" dans la méthode du contrôle ponctuel.

Elle consiste à déterminer les parties bien identifiables des 2 contours : tous les détails incongrus sont coupés mais conservés; chaque fois qu'un détail est coupé, une décision est à prendre, compte-tenu des informations disponibles (clichés etc...) : faute ? ou impuissance ? (généralisation inévitable, ombres etc...). Dans les essais auxquels nous avons procédé, cette purge est pour la plus grande partie interactive : seules certaines portions hors tolérance sont décelées par calcul.

### Méthodologie proposée pour le contrôle linéaire

- Choix au hasard de  $n$  objets-carte  $K_1$  ( $n \geq 100$ ), et appairage avec les objets homologues de référence  $K_2$ . S'il s'agit de tronçons de routes ou de voies d'eau, il vaut mieux un grand nombre de tronçons assez courts (par ex :  $< 2 - 400$  m au 1 : 30 000) qu'un petit nombre de tronçons longs; noter aussi que dans ce cas un traitement particulier des extrémités est nécessaire.

- "Purge" de couples ( $K_1 - K_2$ ) : plus cette purge préalable est soignée, plus la suite est rapide.

- Répéter jusqu'à ce que :  $ems_{12} \approx ems_{21} \approx ems_H$  (avec ou sans les objets hors tolérance) et  $I \approx I_0$  :

- purge complémentaire des contours (si ce n'est pas la première itération),
- choix des  $em_q$  à priori carte  $em_{q10}$  et référence  $em_{q20}$ ,
- calcul des écarts moyens standard  $ems_{12}$ ,  $ems_{21}$ ,  $ems_H$ , des indices moyens de généralisation réel  $I$  et simulé  $I_0$ .

L'estimation définitive de l' $em_q$  est alors  $em_{q2} = (ems_{12} + ems_{21} + ems_H) / 3$  ; on donne simultanément les pourcentages  $P_1, P_{11}, P_{12}$  et  $P_2, P_{21}, P_{22}$  ; ainsi que taille de l'échantillon, nombre de sommets-carte, référence, côté moyen carte, côté moyen référence; s'il y a lieu on fournit aussi l'estimation par la méthode du contrôle ponctuel.

#### 2.4.1.3 Résultats

Ils sont relatifs à sept échantillons distincts. Le tableau 1 donne quelques résultats intermédiaires : écarts moyens standard, indices moyens réel  $I$  et simulé  $I_0$  de généralisation (le chiffre entre parenthèse est l'écart-type). Le tableau 2 donne les résultats définitifs :  $em_{qp}$  est l' $em_q$  estimée par la méthode du contrôle ponctuel,  $em_{ql}$  celle estimée par la méthode du contrôle linéaire,  $P_1, P_{11}, P_{12}, P_2, P_{21}, P_{22}$  les pourcentages définis plus haut (accord carte-référence, fautes, désaccords divers; idem pour référence-carte).

Le tableau 1 montre l'accord des "écarts-moyens-standard" en fin d'itération; cet accord n'a été vraiment obtenu que lorsque nous avons compris combien était nécessaire la "purge" des couples de contours. Par ailleurs compte-tenu de la médiocre précision de l'indice  $I$ , l'accord ( $I - I_0$ ) est bon; en ce qui concerne les axes routes (R38, 2), on note une anomalie : la moyenne pondérée de  $I$  est 0.015, celle de  $I_0$  : 0.067 ; effectivement, l'examen des tronçons, montre que bien souvent le tracé 1 : 30 000 est plus "brisé" qu'au 1 : 8 000, sans doute parce que le pointé de l'axe, par suite de la moindre résolution des clichés 1 : 30 000 est plus difficile qu'au 1 : 8 000, et brise la régularité du tracé.

	$n$ objets	$ems_{12}$ ( $10^{-2}$ )	$ems_{21}$ ( $10^{-2}$ )	$em_H$ ( $10^{-2}$ )	$I$ ( $10^{-3}$ )	$I_0$ ( $10^{-3}$ )
Montpellier réf. 1 : 8 000 Mt 318 (bâti)	221	1.12 (9)	1.09 (9)	1.08 (3)	0.001 (10)	0,0022 (8)
Mt 328 (Bâti)	265	1.11 (2)	1.09 (3)	1.07 (2)	0.009 (15)	0.018 (7)
R38 (axes routes)	47	1.05 (5)	0.99 (4)	0.97 (4)	- 0.014 (19)	0.051 (18)
Remm (axes routes)	65	1.16 (6)	1.11 (6)	1.11 (6)	0.037 (23)	0.078 (10)
Mt 3132 réf. 1 : 30 000 (bâti)	280	0.88 (2)	0.87 (2)	0.85 (2)	- 0.009 (14)	0.002 (7)
Mulhouse réf. 1 : 17 000 (bâti)	190	1.65 (4)	1.68 (4)	1.65 (4)	- 0.0171 (18)	- 0.012 (7)

tableau 1 (unité = m)

	<i>nn</i>	<i>emq<sub>p</sub></i>	<i>emq<sub>L</sub></i>	<i>P<sub>1</sub></i>	<i>P<sub>11</sub></i>	<i>P<sub>12</sub></i>	<i>P<sub>2</sub></i>	<i>P<sub>21</sub></i>	<i>P<sub>22</sub></i>
Montpellier réf. 1 : 8 000 Mt 318 (bâti)	221	1.076 (2)	1.096 (2)	95.1	3.4	1.5	94.3	2.9	2.8
Mt 328 (bâti)	265	1.140 (2) (2029 pts ; 80 rejetés)	1.090 (2)	93.5	4.1	2.4	92.3	4.1	3.6
R 38 (axe routes)	47	--	1.00 (5)	94.3	5.3	0.4	94.2	5.3	0.5
Remm 2	65	--	1.13 (6)	96.7	3.2	0.1	96.6	3.3	0.1
Mt 3132 (bâti) réf. 1 : 30 000	280	0.88 (2113 pts ; 96 rejetés)	0.90 (2)	99.8	0.2	--	99.8	0.2	--
Mulhouse (bâti) réf. 1 : 17 000	190	1.89	1.66 (4)	84.4	4.9	10.7	83.2	3.8	13.0

**tableau 2 (unité = m)**

Dans le tableau 2, on note d'abord le cas de Mulhouse (centre ville) : la référence (1 : 17 000) nous a semblé une saisie médiocre (fautes, nombreuses bizarreries de détail); un fort systématisme E-0 (0,80 m) a été constaté, et beaucoup d'objets sont très complexes, ce qui explique les très forts pourcentages de "désaccords divers" ( $P_{12} = 11\%$ ,  $P_{22} = 13\%$ ). On notera aussi l'homogénéité des deux saisies au 1 : 30 000 par le même opérateur : 0,9 m d'emq, soit :

$$0.9 \sqrt{2} = 0,64 \text{ m par saisie, avec pratiquement } 100\% \text{ d'accord....}$$

Dernières remarques :

- quand on scinde l'échantillon ( $n > 200$ ) en 2 ou en 4, la stabilité est bonne : emq ponctuelle et emq linéaire varient parallèlement,

- si, pour le bâti, on classe les objets par nombre de sommets, donc par complexité croissante, on observe dans le cas de Mulhouse (centre ville) une variation significative :

<i>Nombre sommets</i>	<i>n objets</i>	<i>emq<sub>p</sub></i>	<i>emq<sub>L</sub></i>
≤ 8	120	1,56	1,57
9 < ≤ 16	33	1,73	1,98
> 16	29	1,97	2,03

- dernière constatation fort curieuse : on observe (tableau 2) que les pourcentages  $P_1$  (accord trait-carte avec le trait-référence) sont toujours un peu plus forts, si peu que ce soit, que les pourcentages  $P_2$  (accord référence-carte); il est possible que ce soit pur hasard; il est possible aussi qu'il faille rapprocher ceci de la dissymétrie évoquée plus haut : la carte est plus proche de la référence que la référence de la carte.

#### 2.4.1.4 Conclusion

Le "contrôle linéaire" semble donc une alternative viable au "contrôle ponctuel", à condition, tout comme celui-ci d'ailleurs, de satisfaire à une méthodologie assez rigoureuse.

Il n'exclut nullement le contrôle ponctuel, très simple, qui doit être simultanément pratiqué quand les points homologues existent en nombre suffisant. Il a l'avantage d'être plus général puisqu'il ne suppose pas l'existence de points homologues mais seulement celle de contours homologues; il oblige aussi à préciser et à quantifier les causes de désaccord référence-carte; il inclut la dissymétrie carte-référence; enfin il ne nécessite que des travaux d'atelier, si on dispose d'une référence (autre saisie à grande échelle, carte, base...) suffisamment exacte (le moyen de disposer d'une telle référence pourrait être prévu dès la prise de vue).

En revanche, il nécessite des logiciels un peu délicats à mettre au point.

#### 2.4.2 Qualité des MNT

*par Edouard BEAUVILLAIN*

##### 2.4.2.1 Objectifs et activité

L'objectif de cette action est la définition de mesures adaptées au contrôle de la qualité des Modèles Numériques de Terrain (MNT) dans le cadre d'applications déterminées (la cartographie en particulier). De nombreuses pistes théoriques ont été évoquées dans des travaux précédents [POLIDORI 91] et l'on s'oriente actuellement vers un contrôle stratifié d'éléments morphologiques précis (lignes de crête, thalwegs). L'activité de l'année 1992 est restée faible pour des raisons de disponibilité des chercheurs affectés à l'étude, et se limite à des tests de comparaison entre MNT et réseau hydrographique (voir le paragraphe "Extraction du réseau hydrographique").

L'étude est reconduite en 1993.

##### 2.4.2.2 Références

[POLIDORI 91] L. Polidori : *Validation de Modèles Numériques de Terrain; Application à la Cartographie des Risques Géologiques*, thèse de l'Université Paris 6 - décembre 1991

### 2.5 AUTRES ACTIVITES

#### 2.5.1 Lecture automatique de cartes scannées

*par Marc PIERROT-DESEILLIGNY et Hervé LE MEN*

##### 2.5.1.1 Contexte / Objectifs

L'objectif de cette étude est d'automatiser la création de bases de données géographiques en partant de cartes numérisées. Cette étude est réalisée dans le cadre d'une thèse financée par le CERSIAT/BAE de l'État Major de l'Armée de Terre; cette thèse est co-dirigée scientifiquement par l'EHEI (Pr. G. STAMON, Université de Paris 5) et le Service de la Recherche de l'IGN (H. LE MEN).

Les avantages et inconvénients de cette approche par rapport à l'extraction automatique à partir de photos (aériennes ou satellitaires) sont les suivants :

- avantages : c'est un travail techniquement beaucoup moins difficile pour lequel il semble plus réaliste d'arriver à moyen terme à une solution acceptable,
- inconvénients : les données que l'on extrait sont moins actuelles et moins précisément localisées.

Ces spécificités font que les applications que l'on peut envisager en France pour ce genre d'études sont :

- création de base de données sur des zones d'intérêt secondaire,
- création de base permettant de faciliter l'extraction sur photos (on se ramène à l'étude d'un recalage fin à partir d'un tracé approché et à un problème de mise à jour, mais ces deux aspects devront de toutes façons être étudiés pour la lecture automatique de photographies aériennes),
- création de produits d'attente pour les projets de saisie manuelle à long terme.

### 2.5.1.2 Activité / Résultats

Le travail de l'année 1992 a essentiellement porté sur l'extraction du réseau routier à partir d'une carte JOG digitalisée. La principale difficulté de ce travail résidait dans la reconstruction à haut niveau d'un graphe cohérent à partir des données (de type vecteurs spaghettis) issues des traitements en amont. On a développé un certain nombre d'algorithmes permettant d'effectuer la reconstruction en prenant en compte la connaissance a priori que l'on a sur ce que doit être un graphe de réseau routier. La fiabilité des résultats est satisfaisante à l'exception des zones urbaines que l'on a exclu de champ de cette étude dès les phases de bas niveau.

La fin de l'année a été consacrée à l'étude de l'extraction des chaînes de caractères horizontales sur une planche de noir d'une carte IGN au 1 : 50 000. Les résultats semblent satisfaisants pour la reconnaissance à bas niveau (extraction des caractères isolés) mais sont encore insuffisants pour la phase de haut niveau (regroupement en chaînes cohérentes afin de lever les ambiguïtés).

L'effort de l'année 1993 sera concentré sur la planche de noir de l'IGN au 1 : 50 000. On compte, dans la mesure du possible, aborder les thèmes suivants :

- extraction du bâti,
- continuation du travail sur les chaînes de caractères horizontales,
- extraction du réseau routier,
- évaluation chiffrée de la qualité des résultats par comparaison avec une saisie manuelle (BDCarto),
- extraction de certaines chaînes de caractères orientées,
- construction de liens entre les différents types d'objets extraits.

D'autre part l'IGN s'apprête à lancer une thèse dont le travail portera sur l'extraction des planches de vert et de bleu d'une carte IGN.

### 2.5.1.4 Références

[PIERROT DESEILLIGNY 91] M. Pierrot Deseilligny : *Automatisation de l'extraction du réseau routier à partir de cartes JOG digitalisées*, Mémoire de DEA, IGN - 1991.

## 2.5.2 Interprétation multitemporelle d'image satellite

*par Olivier JAMET*

### 2.5.2.1 Contexte - Objectifs

Cette étude a été entreprise en 1991 dans le cadre d'un contrat, signé avec SCOT-Conseil, pour fourniture par ce dernier de prestations à la CEE (Centre Commun de Recherche d'ISPRA - Italie). L'objectif visé concernait l'évaluation d'un processus d'interprétation multitemporelle de l'occupation du sol sur images satellites en vue d'établir des prévisions de récolte.

### 2.5.2.2 Activité / Résultats

L'activité de l'année se résume à la mise en oeuvre du processus d'interprétation choisi [IGN 92]. Cinq dates sont utilisées sur chaque site, comprenant des images SPOT et LANDSAT. Les images sont segmentées à chaque date; chaque segmentation est enrichie des frontières détectées sur les dates antérieures. Les parcelles ainsi obtenues sont alors classées au maximum de vraisemblance, après apprentissage par photo-interprétation (données fournies par SCOT-Conseil). L'interprétation à la

date antérieure est prise en compte en l'exprimant comme probabilité a priori d'appartenance de chaque parcelle à chaque classe de la légende choisie.

Les principales difficultés ont résidé dans la manipulation d'importants volumes de données, et ont finalement conduit à opter pour un traitement de chaque site par morceau.

Les résultats obtenus se sont montrés décevants quant à la qualité des interprétations, en raison de la pauvreté des données d'apprentissage disponibles pour le classement des parcelles. L'étude a toutefois prouvé la faisabilité du processus, dont la robustesse a été mise en évidence sur des critères de cohérence interne (convergence du classement au fil du temps).

Le rapport de fin d'étude a été remis à SCOT-Conseil en août 1992 [JAMET 92].

### 2.5.2.3 Prolongements envisagés

Cette étude contractuelle n'a pas de suite directe dans le cadre de la CEE. La méthode pourra présenter des applications à l'IGN dans le cadre de la saisie de l'occupation du sol de la Base de Données Cartographique. Une étude complémentaire est cependant nécessaire, concernant la caricature géométrique des segmentations obtenues, afin d'en dériver une représentation du terrain compatible avec les saisies manuelles actuelles.

D'autre part, l'étude a montré l'intérêt, pour l'interprétation de l'occupation du sol sur image satellite, de l'algorithme de segmentation proposé par H. LE MEN [LE MEN 90]. L'algorithme a été communiqué au CNES qui doit procéder à des évaluations complémentaires.

Enfin, l'IGN participe à une étude effectuée à l'ONERA et coordonnée par le CNES, concernant l'utilisation de processus de segmentation pour les opérations de mise à jour de données géographiques. Les procédés mis en oeuvre dans le cadre de cette étude feront appel à des techniques proches de celles employées pour l'exploitation multitemporelle des segmentations.

### 2.5.2.4 Références

[IGN 92] *Activité du COGIT*, Bulletin d'Information de l'IGN n° 60, pp. 16-18 - avril 92.

[JAMET 92] O. Jamet : *Interprétation Automatique Multitemporelle de l'Occupation du Sol sur Images Satellite: Méthodologie et Résultats*, rapport de fin d'étude, Service de La Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - août 1992.

[LE MEN 90] H. Le Men, O. Jamet : *Interprétation Automatique de l'Occupation du Sol sur Images SPOT*, Symp. Intern. Cartographie Thématique Dérivée des Images Satellites - ACI, Saint-Mandé (F) - octobre 1990.

# 3 - INSTRUMENTATION

par Christian THOM et al

Les travaux de recherche de 1992 du **Laboratoire d'Opto-Electronique et Micro-Informatique** ont été marqués pour l'instrumentation par trois événements principaux :

- l'arrivée du premier prototype de **caméra numérique**. Ceci a lancé les travaux de recherche dans des domaines aussi variés que la technologie et la qualification des DTC, la conception de systèmes embarquables, l'informatique de pilotage de la caméra etc... Ces travaux ont été gênés par les problèmes entachant le capteur 4000 x 4000 utilisé dans la caméra, qui a dû être changé deux fois jusqu'ici, et nous sommes en attente d'une quatrième version en ce moment. Ces opérations nécessitent le retour de la caméra aux USA, ce qui entraîne évidemment un délai important. Néanmoins, nous comptons toujours réaliser début 1993 la première mission aérienne à but photogrammétrique de la caméra.

- Les travaux de réalisation de la **station laser ultra mobile** sont arrivés à une étape importante : la réception des premiers échos sur satellite, ce qui marque le passage de la phase réalisation à celle de mise au point,

- les simulations du procédé de **métrologie laser aéroportée** ont confirmé sa validité, ce qui a amené la poursuite de cette opération menée en collaboration avec la société ELF-AQUITAINE (Production) par la construction en 1993 d'un prototype d'instrument.

Ces événements marquent bien, ici en ce qui concerne l'instrumentation, la volonté et la capacité de l'IGN de maîtriser les technologies de pointe dans son domaine de compétence.

## 3.1 REALISATIONS

### 3.1.1 Réalisation d'un prototype de caméra aérienne numérique

par Christian THOM et Isabelle JURVILLIER

#### 3.1.1.1 Contexte - Objectifs

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

D'autre part, la qualité radiométrique des images que l'on espère obtenir étendra certainement le domaine des prises de vue aériennes.

En ce qui concerne l'état de l'art dans ce domaine, des constructeurs de caméras aériennes confiaient en 1991 qu'ils avaient des projets secrets à l'étude mais aucune publication ni réalisation n'a été à ce jour présentée.

Les objectifs scientifiques du projet sont principalement :

- la définition des caractéristiques idéales de la caméra aérienne numérique,
- l'étude de la qualité des images obtenues,
- l'étude de l'élargissement du champ des possibilités de la prise de vue aérienne dû à l'utilisation d'un capteur ayant une grande dynamique,
- l'étude de l'impact dans la chaîne de production (disparition à terme du film argentique ; information numérique donc infiniment reproductible sans altération ; aide à la restitution).

### 3.1.1.2 Activité / Résultats

#### • Etat des travaux fin 1991

Le calculateur embarqué destiné au pilotage de l'ensemble de l'appareillage a été livré fin décembre 1991. La caméra était à ce moment-là en cours de fabrication et sa livraison prévue pour le début d'année 1992.

Au cours de l'année, les travaux de deux stagiaires ont permis la réalisation de cartes électroniques pour la mesure de l'attitude de l'avion et pour le contrôle de l'exposition au moment de la prise de vue.

#### • Travaux de 1992

Une première version de la caméra a été reçue en février. Le constructeur du capteur (Loral Fairchild Imaging System) n'ayant pas pu fabriquer de capteur 4K x 4K conforme aux spécifications, plusieurs versions (trois jusqu'à présent, la dernière livrée en août), toutes provisoires, ont été installées dans la caméra numérique.

La réception du système a permis d'entreprendre le développement des logiciels de gestion de la caméra et des ensembles périphériques. D'autre part, un stagiaire a développé une carte électronique pour le contrôle des vibrations à bord de l'avion afin de savoir quelles sont les conditions de fonctionnement de l'informatique embarquée au cours d'une mission aérienne.

Diverses mesures (bruit de photons, bruit de lecture, courant d'obscurité, non uniformité des pixels...) ont été faites pour évaluer la qualité des capteurs. Le défaut majeur de tous ces capteurs est la très faible valeur de la capacité maximale des pixels, ce qui signifie que très peu de lumière suffit à saturer le capteur. En pratique, pour la prise de vue en extérieur, les filtres placés devant l'objectif ne laissent passer que 1/512 ème de la lumière incidente. S'ajoute à ce problème le fait qu'il est très difficile de trouver dans le commerce un obturateur à grand champ rapide. Celui qui est installé sur la caméra ne permet pas de descendre en dessous de 20 ms de temps d'exposition au centre du champ. Les recherches dans cette voie là continueront donc en 1993.

Un premier essai en vol a été réalisé en juin [2]. Le principal objectif de cet essai en vraie grandeur était de mettre au point l'installation du matériel dans l'avion, de s'assurer de sa fiabilité dans les conditions réelles d'une mission de photographie aérienne et de tester les logiciels qui pilotent la caméra et les équipements annexes. Cette mission a permis de ramener quelques images numériques malgré la mauvaise qualité du capteur, la défaillance du système de refroidissement qui s'est produit ce jour là et les conditions météorologiques défavorables.

La carte CPU installée dans la station embarquable basée sur un microprocesseur MOTOROLA 68030 implantée initialement dans le système ne convenait pas pour sauvegarder rapidement en vol les images obtenues (plus d'une minute pour sauver 32 Mo). Une nouvelle carte CPU plus performante à base d'un microprocesseur MOTOROLA 68040 a été installée dans le système. Avec celle-ci plus quelques autres améliorations, le temps nécessaire à l'acquisition d'une image (lecture et sauvegarde sur disque dur) est de 18 secondes, ce qui permet maintenant de faire du recouvrement d'images.

Une étude a été entreprise pour développer un système de surveillance des mouvements de l'avion à l'aide des images numériques obtenues par la caméra secondaire de surveillance. La méthode repose sur la corrélation de deux images numériques prises à deux instants rapprochés de laquelle on déduit le déplacement longitudinal et transversal de l'avion entre les deux prises de vue. Connaissant l'altitude de vol et la focale de l'objectif, on peut donc obtenir la dérive de l'avion et sa vitesse d'où l'on peut déduire la fréquence de déclenchement des prises de vue.

Mais le système permet aussi de surveiller les mouvements de l'avion au cours de l'opération principale de prises de vue avec la caméra de grande résolution. La méthode consiste à prendre une image avec la caméra de surveillance avant chaque prise de vue principale. Si les mouvements de l'avion, tangage principalement, sont trop importants, la valeur du déplacement transversal sera très supérieur à la dérive prévue. On pourra alors soit retarder la prise de vue principale soit simplement signaler dans l'entête de l'image ce mouvement important.

Quand ce système s'avèrera fiable, les centrales gyroscopiques volumineuses et longues à installer pourront être supprimées.

Les images numériques obtenues avec la caméra de grande résolution sont entâchées d'un certain nombre de défauts dus à des pixels défectueux du capteur, principalement colonnes sombres ou brillantes. Mais on observe aussi que certaines colonnes sont décalées, défaut conjugué avec une anomalie du transfert de charges. Un programme, nécessitant encore un certain nombre de développements, détecte sur des images test ces défauts, ce qui permet ensuite de les corriger automatiquement sur toutes les images obtenues avec ce capteur.

En marge du projet, un stéréoscope à miroirs a été conçu et construit par le laboratoire avec la participation des ateliers de mécanique, pour permettre le contrôle stéréoscopique des images numériques. C'est un équipement léger qui se fixe sur un moniteur 19" (type SONY) de station de travail. Un logiciel permet d'afficher les deux images prises de deux points de vue différents et de faire les réglages permettant la vision stéréoscopique.

Les premières études de faisabilité concernant la réalisation d'une orthophoto à partir d'images numériques ont été réalisées par J. DUCLOUX. Les images numériques 512 x 512 pixels utilisées ont été obtenues en labo avec la caméra numérique de surveillance et simulent une prise de vue réelle.

### 3.1.1.3 Prolongements envisagés

En 1993, en dehors de l'installation et de la qualification du prochain capteur, les travaux prévus concernent :

- la définition d'un plan d'action à moyen terme,
- la mise au point d'un procédé automatique de prise de vue à l'aide de la caméra numérique,
- le test en vol des programmes de surveillance des mouvements de l'avion et leur amélioration,
- la continuation du développement du programme de correction des images,
- une ou des missions aériennes de photogrammétrie et l'exploitation des images obtenues (en particulier, réalisation d'une grande orthophoto),
- l'achat et l'installation d'un système de sauvegarde des images en vol, la capacité du disque dur (1 Go) ne permettant actuellement de stocker qu'une trentaine d'images par mission,
- la fiabilisation et l'amélioration de l'ergonomie du système en vue de son exploitation en production.

Kodak annonce fin 1992 la sortie d'une caméra numérique de 2048 x 2048 pixels codés sur 8 bits, la matrice étant lue à 10 Mhz, ce qui permet de prendre 2 images par seconde. Cette caméra n'est pas encore commercialisée mais dès qu'elle le sera, il sera intéressant de connaître les performances de ce système : dynamique, sensibilité, bruit....

### 3.1.1.4 Références

[THOM et al] Ch. Thom, I. Jurvillier & P. Mousnier Lompré : *Réalisation d'un prototype de caméra aérienne numérique*. Forum F13G, Strasbourg (F) - mai 1992.

[THOM, JURVILLIER] Ch. Thom, I. Jurvillier : *Compte-rendu du premier essai en vol de la caméra numérique*. Service de la Recherche, Laboratoire LOEMI, IGN - juin 1992.

## 3.1.2 Réalisation d'une station LASER ultra-mobile

*Responsables : Michel KASSER et William GRUNSPAN*

### 3.1.2.1 Contexte - Objectifs

La technique de la télémétrie laser a une vingtaine d'années et permet la mesure de distances de 1 000 à 200 000 km avec aujourd'hui une précision centimétrique.

Une vingtaine de stations existent à travers le monde. Mais les coûts et les technologies mis en jeu font qu'elles sont concentrées dans les pays développés. Ce sont des expériences complexes représentant plusieurs tonnes de matériels et les quelques stations dites mobiles ne se déplacent qu'à grand frais avec une structure du type semi-remorque. Par conséquent, la répartition géographique des observations est très irrégulière et ceci entraîne une dégradation des mesures obtenues localement.

Le CNES, l'INSU et l'IGN ont donc décidé en 1988 de réaliser ensemble une station laser ultra-mobile en optimisant la transportabilité. Le résultat est un instrument de 300 kg répartis en dix colis répondant aux normes du frêt aérien. Deux personnes suffisent pour mettre en oeuvre l'expérience. Le coût de réalisation de points géodésiques est donc considérablement réduit, que ce soit pour les continents mal représentés ou pour des sites difficilement accessibles.

Cette station laser est donc destinée à deux types de programmes de recherche :

- l'orbitographie de haute précision pour :
  - l'étude du champ de forces qui s'applique sur le satellite permettant le calcul du potentiel de pesanteur terrestre et d'un géoïde ultra-précis,

- l'étude de la rotation de la Terre,
- la calibration d'altimètres radar océanographiques embarqués avec en particulier le programme Topex-Poséidon. Une station laser située sur une île, proche de la trace au sol du satellite apporte une information qui contraint fortement les mesures radar, mesures détériorées par la propagation dans la troposphère.

- le positionnement absolu de stations qui est déterminé à partir de la connaissance d'orbites. Cette localisation faite dans un référentiel lié au centre des masses de la Terre atteint des précisions inférieures à 3 cm. Les applications sont alors :

- la tectonique globale, la sismogénèse,
- l'établissement ou la liaison de systèmes de référence en liaison avec le réseau GPS, DORIS ou VLBI.

### 3.1.2.2 Activité / Résultats

- **Etat des travaux fin 1991**

Certains sous-ensembles étaient disponibles début 1992, en particulier le laser YAG de Quantel, le télescope de SESO-BERTIN. En interne, l'électronique et l'informatique réalisées par F. PIERRON et l'équipe de la station laser de l'Observatoire de la Côte d'Azur, la mécanique de la partie mobile de la tourelle conçue au CNES par L. GOSSET étaient en cours d'achèvement. Enfin, la conception de l'optique et la réalisation de sous-ensembles mécaniques, comme le trépied, avaient été pris en charge par l'IGN.

La livraison de la tourelle de KERN-LEICA était attendue pour Mars 1992.

- **Travaux de 1992**

L'intégration de la station laser commença en avril dès que tous les sous-ensembles et de nombreuses petites fournitures diverses furent disponibles. L'assemblage opto-mécanique de la tourelle se fit à Toulouse dans les ateliers de la société St-Eloi mécanique. La conception et la fabrication furent validés très rapidement par l'expérience.

La station était alors disponible, à l'O.C.A., et l'étape suivante consistait à tirer sur une cible fixe située à 8 km, résultat plus difficile à obtenir que le passage d'une cible fixe à une cible mobile. C'est effectivement ce qu'a montré l'histoire des deux stations laser fixes de l'observatoire.

Après avoir travaillé principalement sur la stabilité du laser et sur l'alignement des trois axes optiques, émission réception et visée, les premiers échos arrivèrent. Ils ont permis de qualifier la station sur différents critères :

- la précision est de l'ordre de 2 à 3 cm comme attendu, ce qui est proche de la limite technologique actuelle,
- l'utilisation d'un détecteur sensible au simple photon-électron, une photodiode à avalanche en mode GEIGER permet effectivement de compenser le très mauvais bilan de liaison dû à la taille du télescope : 13 cm de diamètre,
- le bruit thermique du détecteur est devenu supportable à température ambiante grâce à un changement de choix pour la diode,
- la calibration de la station, seulement en cours, grâce à différents rattachements réalisés par une équipe du Service de la Géodésie de l'IGN.

En Septembre, la phase des réglages et de la mise au point se terminait donc à Grasse. En novembre, lors de la première tentative de poursuite, des échos ont été obtenus sur le satellite Topex-Poséidon et validés grâce à une collocation avec la station laser fixe de l'observatoire. Sauf imprévu, la mise en place de la station sur un site demandera comme prévu au plus deux jours et deux personnes qui suffiront ensuite pour son exploitation.

### 3.1.2.3 Prolongements envisagés

Le travail consiste maintenant à améliorer la convivialité des logiciels et la fiabilité grâce à la réalisation de moyens de contrôles compatibles avec une utilisation hors laboratoire. Un problème subsiste dans l'informatique de la tourelle et le rachat de KERN par LEICA a fait disparaître une partie du savoir faire : les interventions sont plus difficiles.

La station laser devrait être opérationnelle en début d'année 1993. Elle sera alors envoyée à Trapani (Sicile), pour calibrer l'altimètre radar du satellite Topex-Poséidon.

Une démarche entre le CNES, l'INSU et l'IGN pour la création du Comité Scientifique semble souhaitable : l'échéance pour l'utilisation de cet instrument se rapproche.

Enfin, les quelques présentations faites de la station laser lors de Congrès ont vivement intéressé certains organismes étrangers. La duplication en quelques exemplaires est donc à envisager d'autant plus que la miniaturisation acquise au prix d'études très poussées a permis de limiter l'investissement en matériel à 6 MF environ, soit moins du quart de la dernière station laser mobile construite.

Compte tenu de l'évolution des capacités de positionnement de grande précision apportées par la mise en place de l'IGS pour l'emploi du GPS, il semble que certains aspects d'emploi prévus pour la Station Laser Ultra Mobile vont devenir moins critiques que lors de la mise en place du projet (création de points d'appui pour les grands réseaux GPS par exemple). Par contre toutes les analyses que l'on peut mener actuellement montrent clairement qu'une importante amélioration des performances du réseau Laser (SLR) mondial peuvent découler d'une couverture mondiale en stations bien plus homogène qu'aujourd'hui (exemple de DORIS entre autres). Nous pensons donc qu'il est particulièrement urgent d'étudier de manière approfondie quelle stratégie doit être mise en place pour mettre en oeuvre notre Station Laser de manière optimale, tant en durée d'observations sur chaque site qu'en choix de sites au niveau mondial. Ce problème pourrait être étudié dans le cadre d'une thèse à l'IGN, ce qui permettrait de valoriser en retombées scientifiques en géodésie le travail d'instrumentation effectué.

### 3.1.2.4 Références

[PIERRON et KASSER] F. Pierron & M. Kasser : *The French Highly Mobile Laser System, Lidar and Earth Sciences*, Cannes (F) - septembre 1991.

[KASSER et PIERRON] M. Kasser & F. Pierron : *Développement d'une station très compacte de télémétrie laser sur satellites*. ICSSO'91, Conférence Internationale d'Optique Spatiale, Toulouse (F) - septembre 1991.

[PIERRON et KASSER] F. Pierron & M. Kasser : *New développements in Ultra-mobile SLR System*, Crystal Dynamics Meeting, NASA GSFC Washington (USA) - octobre 1991.

[PIERRON et KASSER] F. Pierron & M. Kasser : *Présentation de la FTLSR*, SLR Commission du CSTG, Londres (GB) - décembre 1992.

### 3.1.3 Mise au point et exploitation des données d'une caméra à comptage de photons pour l'astronomie

par Christian THOM

#### 3.1.3.1 Contexte - Objectifs

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

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

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

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

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

#### 3.1.3.2 Activité / Résultats

A part quelques perfectionnements de la caméra CP40 (changement de version du système d'exploitation, intégration d'un disque dur de grosse capacité et d'un DAT), l'essentiel du travail a surtout porté sur la préparation de l'appel à proposition de l'ESO (European Southern Observatory) concernant la

caméra haute résolution visible qui est sorti en fin d'année 1992 (réf. PI/ESO/INS/92/7583/GWI).

Il s'agit de réaliser le "capteur" haute résolution angulaire dans le domaine visible, le mot capteur pris au sens large ici, c'est-à-dire allant de la télécommande complète de l'instrument à la réduction des données. L'ESO favoriserait la formation d'un consortium de différents laboratoires dont celui de R. FOY.

Les questions à l'étude ont été :

- choix de la technique employée : CCD nu bas bruit à lecture rapide, CCD intensifié à lecture rapide, CCD bombardé (placé directement dans un tube intensificateur) et dispositifs à anode résistive,
- dispositif de centrage des photoévénements (si nécessaire),
- dispositif de stockage de gros débit et grosse capacité.

Enfin, dans le domaine de la réduction des données, j'ai travaillé à un procédé de reconstruction d'images utilisable en interférométrie des tavelures, qui permettrait de pallier certains problèmes qui apparaissent lors du traitement des images acquises en comptage de photons. Des travaux analogues ont permis à l'équipe de R. FOY de présenter un communication sur la résolution du compagnon de T. TAURI dans la raie Ha, au Symposium UAI 158 "Very High Angular Resolution Imaging" à Sydney (AUS), 11-15 Janvier 1993.

### 3.1.3.3 Prolongements envisagés

En 1993 seront évidemment poursuivis les travaux concernant la proposition de l'ESO. L'IGN pourrait éventuellement bénéficier d'un contrat d'étude durant l'étude de phase A, sur un sujet encore à préciser, ainsi que de la réalisation de certains sous-ensembles logiciels durant la phase B (en 1994...).

## 3.1.4 Simulation d'un procédé de télémétrie LASER aéroportée à champ large

*par Michel KASSER et Christian THOM*

### 3.1.4.1 Contexte - Objectifs

La composante verticale des déformations tectoniques sismiques ou asismiques dans les domaines géodynamiques actifs tels que les rifts, les chaînes de collision ou les arcs de subduction est de l'ordre du millimètre ou du centimètre par an. De la même manière, les vitesses de subsidence maximales dues à la déplétion des réservoirs au droit de champs d'hydrocarbures exploités n'excèdent que rarement le centimètre par an et restent généralement comprises entre 1 et 5 mm/an (e.g., le champ de Lacq : 2 mm/an de subsidence sur 30 ans). A ce jour, aucune technique de mesure de mouvements verticaux ne peut atteindre ce degré de précision sauf par nivellement de précision et moyennant une étude lente et très onéreuse. Les autres techniques telle que le positionnement GPS ne fournissent pas de mesures altimétriques au millimètre près. Ce problème a conduit l'Institut Géographique National, en collaboration avec la SNEA(P), à s'intéresser au développement d'une nouvelle technique permettant de mesurer sur un temps très bref (une heure) des déformations verticales de l'ordre du mm d'une topographie sur une aire de 100 km<sup>2</sup> environ ; les premières applications d'une telle instrumentation pouvant-être les subsidences au-dessus d'un champ pétrolier en exploitation.

#### Procédé instrumental envisagé :

Pour cartographier les mouvements de surfaces notamment dans le cadre de notre première application, il existe deux types de contraintes dont nous avons tenu compte : (1) les mesures très précises doivent traiter une surface et non plus un cheminement linéaire ; et (2) elles doivent s'effectuer rapidement (moins d'un jour). Le procédé expérimenté au cours de cette étude répond bien aux contraintes énoncées ci-dessus. Il est dérivé du système ALRS (Airborne Laser Ranging System). Il repose sur une instrumentation de télémétrie laser aéroportée visant des cibles réfléchissantes fixées au sol. Dans un avion est installé un dispositif laser pointé vers le sol capable d'émettre des impulsions laser en faisceau divergent. Cette instrumentation doit également collecter les signaux réfléchis par des réflecteurs laser terrestres (cibles type coins-de-cube). Le laser est par exemple un laser YAG de durée d'impulsion proche de 10 ns, émettant à une cadence de 5 à 10 Hz, avec une longueur d'onde de 1.06  $\mu$ m ; les longueurs d'ondes dans l'infra-rouge ayant une diffusion atmosphérique inférieure par rapport au visible sont donc très favorables pour l'expérience proposée. La chronométrie se fera par échantillonnage ultra-rapide du signal détecté (1 Giga-échantillonnages/seconde) avec calcul numérique du barycentre de chaque écho. La précision estimée des mesures est comprise entre 1 et 3 cm pour une distance. Les cibles tournées vers le zénith, doivent avoir un point d'ancrage profond pour réagir aux sollicitations

profondes (et non à des mouvements parasites locaux) et être répartis de manière homogène sur la zone d'étude (pour avoir une mesure globale de la surface considérée). Ces cibles seront des coins-de-cube uniques en verre plein de petit diamètre (2,5 à 3,5 cm). Le bilan de liaison est, en effet, limité seulement par l'optique de réception. L'avion est positionné par un récepteur GPS donnant sa localisation approchée (0,5 m près) lors de chaque tir laser. Ce positionnement a pour unique fonction d'identifier les cibles d'où proviennent les faisceaux réfléchis, une mesure topométrique classique nous ayant préalablement donné leur position approximative à 10 cm près.

Cette recherche constitue la mise en valeur du procédé breveté par l'IGN en 1990\*. Une partie des études a été financée par un contrat avec ELF-AQUITAINE (contrat à frais partagés).

#### **3.1.4.2 Activité / Résultats**

Avant 1992, seule une simulation à une dimension avait été réalisée, démontrant la faisabilité théorique du procédé. Il a donc été décidé de mener une série de simulations complètes et réalistes, pour vérifier que les performances attendues étaient bien atteintes. C'est ce qui a été réalisé en 1992. Les résultats de ces travaux ont été publiés dans un rapport\*\*. Les conclusions en ont été que les précisions des coordonnées obtenues sont bien de l'ordre du millimètre, et ce pour des paramètres de vol et des performances du système d'acquisition réalistes.

Ces simulations ont aussi permis d'affiner les caractéristiques désirées pour les plans de vol, ainsi que les performances nécessaires pour le système d'acquisition des mesures, et pour la partie émission/réception des impulsions LASER (champ optique, taille et fréquence des impulsions etc...), permettant la définition du prototype futur.

Un nouveau contrat avec la Société ELF-AQUITAINE a été passé en novembre, visant à la réalisation en 1993 de ce prototype.

#### **3.1.4.3 Prolongements envisagés**

En 1993 est envisagé la construction de ce prototype, avec essais à terre puis éventuellement réalisation fin 1993 ou début 1994 d'une mission aérienne en vraie grandeur pour démontrer définitivement la validité de ce procédé nouveau.

#### **3.1.4.4 Références**

[KASSER et IGN]\* M. Kasser & IGN : *Procédé pour déterminer les coordonnées spatiales de points, application de ce procédé à la topographie de haute précision, système et dispositif optique pour la mise en oeuvre de ce procédé*, n° Brevet 774.038 (USA), 1991, 33 pages.

[KASSER et al] M. Kasser, O. Bellier, Y. Egels, C. Million, Ch. Thom & D. Fourmaintraux : *Etude d'un procédé de télémétries laser aéroportées sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol*, rapport IGN-SNEA(P) n° 7862, 90 pages - mars 1992.

[BELLIER, KASSER]\*\* O. Bellier & M. Kasser : *Expérimentation de deux instrumentations de télémétrie laser l'une aéroportée et l'autre satellisée, pour la mesure rapide de déformations verticales : résultats préliminaires des simulations*, rapport IGN SNEA(P) n° 7862, 65 pages - septembre 1992.

## **3.2 EVALUATIONS**

### **3.2.1 Evaluation du capteur HRG**

*par Edouard BEAUVILLAIN*

#### **3.2.1.1 Contexte - Objectifs**

Cette action est conduite dans le cadre du groupe de travail Haute Résolution Optique (HRO), organisé par le CNES. Ce groupe de travail, qui rassemble des utilisateurs de données satellitaires dans différents domaines d'application (cartographie, géologie, urbanisme, agriculture, inventaire forestier...) est chargé d'évaluer les choix techniques possibles pour la définition d'un satellite à Haute Résolution Géométrique (Instrument HRG prévu pour SPOT-5). Des expériences sur simulation sont effectuées par les organismes participants.

### 3.2.1.2 Activité / Résultats

Outre la participation au groupe de travail, l'activité de l'année s'est centrée sur la réalisation d'une étude cofinancée par le CNES sur la précision des Modèles Numériques de Terrain obtenus par corrélation automatique dans différentes configurations stéréoscopiques de l'instrument.

Le paramètre étudié est le rapport B/H (Base sur Hauteur), la résolution des images étant fixée (5 m), de même que l'orientation de l'instrument (stéréoscopie avant-arrière, axe de vol nord-sud).

Les simulations utilisées ont été obtenues par numérisation de photographies aériennes (échelle approximative 1 : 20 000), obtenues par prise de vue spécifique avec un très fort recouvrement (80%) permettant la formation de couples stéréoscopiques pour trois valeurs différentes du B/H (0.3, 0.6, et 0.9).

Les modèles numériques de terrain (MNT) calculés par corrélation ont été comparés à un MNT obtenu par interpolation des courbes de niveaux de la Base de Données Topographique pour deux des sites, et à un MNT calculé par corrélation à une résolution trois fois plus fine pour le dernier.

Les conclusions de l'expérience restent limitées quant à la précision absolue de la restitution du relief en fonction du B/H, principalement en raison de conditions expérimentales difficiles (présence de végétation sur les sites, mise en place imprécise...) et du faible nombre de valeurs de B/H testées. La comparaison des trois rapports B/H fait cependant apparaître une décroissance moyenne de l'erreur lorsque le rapport B/H augmente.

Un rapport intermédiaire a été remis au CNES en septembre [BEAUVILLAIN 92]. Le rapport final sera publié au cours du mois de février 1993.

### 3.2.1.3 Prolongements envisagés

L'activité se poursuit en 1993 au sein du groupe HRO. Une étude sur l'influence de la compression des images sur la qualité d'interprétation est en cours de mise en oeuvre. L'IGN pourra éventuellement participer à d'autres expériences décidées par le groupe en cours d'année.

### 3.2.1.4 Références

[BEAUVILLAIN 92] E. Beauvillain : *Evaluation de la Précision des Modèles Numériques de Terrain dans Différentes Configurations Stéréoscopiques de l'Instrument HRG*, rapport intermédiaire étude CNES, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.

## 3.2.2 Radar spatial

par Edouard BEAUVILLAIN

L'objectif de cette action est l'évaluation des capteurs satellitaires RADAR pour les applications cartographiques. Elle est conduite en collaboration avec :

- l'**Aérospatiale** : la convention de détachement d'un ingénieur IGN à l'Aérospatiale pour travailler sur ce thème a été signée dans le courant de l'année; l'IGN participe par ailleurs au suivi d'une thèse effectuée à l'Aérospatiale sur la rectification géométrique d'images radar SAR,

- le **CNES** : un contact régulier est entretenu avec les équipes techniques, en particulier par une participation au groupe de travail GATT (Groupe Accès Tout Temps).

L'activité effectuée en interne à l'IGN était centrée cette année sur l'exploitation d'un logiciel de radargrammétrie (SMART, produit par le JOANEUM RESEARCH, Graz (A)). L'installation de ce logiciel sur notre site a été retardée pour des raisons techniques, et les tests prévus sont reportés en 1993.

## 4 - SIG ET CARTOGRAPHIE

par Benoît DAVID et Jean-Philippe LAGRANGE

*En 1992, les recherches sur les SIG se sont axées principalement sur deux thèmes : la gestion de bases de données géographiques et la généralisation cartographique.*

*Le premier thème recouvre la définition de modèles de données, l'utilisation de SGBD orientés-objet, la gestion de la précision géométrique des données, la gestion de bases de données de grande extension et la gestion de l'historique dans les bases de données géographiques.*

*Le second thème englobe les recherches sur la formalisation de connaissances en vue de la généralisation cartographique ainsi que le développement d'algorithmes de simplification et de caricature d'éléments cartographiques et l'intégration de ces développements dans une plate-forme de généralisation.*

### 4.1 BASES DE DONNÉES GÉOGRAPHIQUES

#### 4.1.1 Modélisation de l'information géographique

par Benoît DAVID et Jean-Philippe LAGRANGE

##### 4.1.1.1 Contexte - Objectifs

Dans le domaine des bases de données, la notion de modèle de données est primordiale. Le modèle de données définit quelles données peuvent être représentées dans la base de données (on parle de schéma de données) ainsi que les traitements qui pourront être exécutés. Pour l'information géographique, il n'existe pas de modèle de données universellement reconnu.

Le but de ce travail est de définir un modèle d'information géographique de type sémantique inspiré principalement des modèles entité-association, HBDS et orientés-objet et du format d'échange FEIV [FEIV] de l'IGN. Le format FEIV permet d'échanger des données mais n'est pas un format de stockage et de manipulation. La partie sémantique du modèle provient de la thèse de JPh. LAGRANGE [LAGRANGE 92].

Le modèle proposé est repris dans les recherches des thèmes base de données ("Prototype de SGBD OO localisée", par exemple) et généralisation cartographique (approche IA principalement) et sert de lien entre les actions de recherche sur les SIG.

##### 4.1.1.2 Définition du modèle de données

###### A. Définition informelle

Le modèle est fondé sur deux notions classiques : **Entité** et **Association**<sup>1</sup>. Une entité est "une abstraction d'un objet du monde réel", une personne, une maison, une ville, une commune sont des entités. Afin de les décrire, on associe à chaque entité un certain nombre de valeurs dont les types sont définis par un **type d'entité**. Une association décrit une relation n-aire quelconque entre entités (ou associations); "une personne est propriétaire d'une maison" est une association entre l'entité personne et l'entité maison. Une association peut porter des valeurs, par exemple ici la date d'achat de la maison. La description des entités associées et des attributs constitue le **type de l'association**.

De plus le modèle présenté ici insiste sur la notion de **composition** que l'on trouve dans la plupart des modèles de données géographiques. Cette notion correspond à la définition d'objets complexes

<sup>1</sup> en anglais relationship

composés d'objets simples. En effet, en géographie, la description sous forme d'objets ou d'entités n'est pas naturelle; le géographe décompose artificiellement la réalité en entités, un peu comme une décomposition en éléments en CAO. Elle n'est évidemment pas unique, elle dépend de spécifications. Cette décomposition est réalisée en particulier sur un critère d'homogénéité de l'élément pour une caractéristique donnée. Par exemple, pour étudier l'occupation du sol, on définit une caractéristique d'occupation et on définit les parcelles sur le critère d'homogénéité de l'occupation et de connexité de la parcelle. Une autre caractéristique conduirait à une autre définition d'entités. La composition permet de regrouper des entités pour en former de nouvelles.

## B. Description formelle du modèle

### B1. Domaine de valeurs

Un domaine de valeurs (ou domaine) est un ensemble de valeurs auquel sont associées des opérations de calcul et des fonctions d'agrégation.

L'ensemble des entiers avec les opérateurs arithmétiques, les comparateurs usuels et la fonction d'agrégation de sommation fournit un exemple de domaine de valeurs.

Parmi les domaines, on distingue les domaines simples prédéfinis (bouléens, entiers, réels, chaînes de caractères...), les domaines simples de localisation, les domaines simples définis en compréhension (entier compris entre 0 et 30) et les domaines complexes ou construits.

Les domaines simples de localisation permettent de modéliser la composante spatiale associée à une entité. Ils sont définis comme des types abstraits de données (TAD), c'est-à-dire qu'ils constituent des domaines simples auxquels sont associés des opérations de calcul et des opérations booléennes, pour plus de détails voir [DAVID 91].

Les domaines complexes sont construits à l'aide des constructeurs **tuple**, **set** et **list**.

### B2. Définition d'attribut

Un attribut est défini en donnant un nom d'attribut et un nom de domaine de valeurs. Un attribut ne peut pas être multivalué, il doit dans ce cas être défini comme un ensemble de valeurs. Un attribut peut être **facultatif** ou **obligatoire**. Si il est facultatif, l'attribut peut ne pas être défini pour certaines entités<sup>1</sup>.

### B3. Type d'entité

Un type d'entité décrit les attributs qui sont portés par les entités définies par ce type.

Un type d'entité est défini par un nom, un ensemble non vide d'attributs et une contrainte exprimée par un prédicat que doit vérifier chacune des entités (cohérence entre attributs). Chaque attribut est soit **explicite**, soit **calculé**, soit **dérivé**. Un attribut est explicite si une valeur est stockée pour chaque entité. A chaque attribut calculé est associée une fonction de calcul qui prend comme paramètres formels les autres attributs de l'entité ou des entités liées par des associations. Un attribut est dérivé par le mécanisme de composition expliqué section B.7.

### B4. Type d'association

Un type d'associations décrit les entités pouvant faire partie de l'association ainsi que les attributs qui sont portés par les associations.

Un type d'association est défini par :

Un rôle correspond à la participation d'un type d'entité ou d'association à une association. Il est défini par un nom, un nom de type d'entité ou de type d'association. Si une entité ou une association n'intervient qu'une seule fois dans un type d'association alors par défaut le nom du rôle est le nom du type d'entité ou du type d'association.

Un attribut d'un type d'association est soit explicite soit calculé; il ne peut pas être dérivé.

### B5. Héritage

Le mécanisme d'héritage est introduit à l'aide de deux concepts différents : la **généralisation** et la **spécialisation**. La généralisation permet de regrouper plusieurs types d'entités ayant des propriétés en commun. A l'inverse, la spécialisation permet de raffiner un type d'entité à partir d'un type d'entité déjà défini.

<sup>1</sup> correspond à la notion "NULL / "NOT NULL" du relationnel

#### B6. Ensemble d'entités (ou d'associations)

Un ensemble d'entités (ou d'associations) est défini par un nom et un type d'entité (ou d'association). Il peut soit être défini en **compréhension** ou en **intention**. A un ensemble d'entités (ou d'associations) en compréhension, sont associées des contraintes que doit vérifier l'ensemble.

#### B7. Le mécanisme de composition

Le mécanisme de composition permet de définir implicitement sur les entités complexes composées d'entités simples des attributs dérivés calculés par agrégation d'attributs correspondants sur les entités simples.

Ce mécanisme est introduit dans le modèle à l'aide d'une information supplémentaire sur les attributs des entités et d'un type d'association particulier appelé "association de composition". Une telle association permet d'associer une entité complexe à ses composants. Pour un type d'entité donné, il ne peut exister qu'une seule association de composition pour laquelle cette entité tient le rôle d'entité composée.

Indépendamment des associations de composition, à chaque attribut d'une entité est associée une fonction éventuelle d'agrégation pour cet attribut. Si cette fonction d'agrégation n'est pas définie, cela signifie que l'attribut ne doit pas être agrégé.

A partir de la connaissance des associations de composition et des fonctions d'agrégation, il est maintenant possible de propager automatiquement sur tous les objets complexes des attributs calculés à partir des attributs définis sur les entités simples.

### 4.1.1.3 Prolongements envisagés

La première version du modèle est terminée, des modifications sont envisageables.

Conformément aux objectifs, les prolongements se situent principalement dans les actions de recherches Base de Données et Généralisation Cartographique de 1993. Le modèle a été partiellement implémenté dans le cadre de l'action de recherche décrite dans la section 3.1.2, il sera complètement implémenté en 1993. De même, le modèle en cours de réalisation dans l'action de recherche décrite dans la section 3.2.1 est largement inspiré du modèle décrit ici.

### 4.1.1.4 Références

[DAVID 91] B. David : *Modélisation, représentation et gestion d'information géographique: une approche en relationnel étendu*, thèse de doctorat de l'université Paris 6 - juillet 1991.

[DUMOLARD 92] P. Dumolard & B. David : *Les fonctions d'analyse dans les SIG du futur*, Actes de MARI'92, pp. 57-63 - avril 1992.

[FEIV] *Documentation FEIV*, document interne IGN.

[LAGRANGE 92] JPh. Lagrange : *OGRE : un système expert pour la génération de requêtes relationnelles*, thèse de doctorat de l'université Paris Dauphine - décembre 1992.

### 4.1.2 Prototype de SGBD Orienté-Objet localisé

par Benoît DAVID, Laurent RAYNAL et Guylaine SCHORTER

Le rapport d'activités de cette action de recherche est extrait de l'article [DAVID et al 92].

#### 4.1.2.1 Contexte - Objectifs

A ce jour, la plupart des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) commercialisés sont bâtis "avec" un SGBD relationnel. Le SGBD gère l'ensemble des données alphanumériques classiques (que nous appellerons par la suite données factuelles) et une solution maison de type fichier gère la partie géométrique et/ou topologique. Un mécanisme complexe de pointeurs traduit les liens entre faits et géométrie. Ceci a pour première conséquence une approche mono-utilisateur du SIG puisque la gestion de fichiers est mono-utilisateur. Il y a, de plus, dysfonctionnement entre les deux niveaux et dualité entre chacun des langages de requête des deux systèmes.

Une autre approche, plus récente, consiste à bâtir le SIG "autour" d'un SGBD relationnel. Auparavant le SGBDR a été étendu à la géographie, c'est-à-dire qu'on lui a ajouté les types spatiaux et les opérateurs, fonctions et prédicats spatiaux associés [LARUE 92]. Cette architecture est plutôt bien adaptée à la gestion des données géographiques. Elle gomme les aspects mono-utilisateur, dysfonctionnement et dualité des langages.

Cependant, il faut bien voir que le système relationnel reste pauvre à plusieurs points de vue : les concepts sont simples; le système de typage est limité; les données doivent être normalisées en première forme normale alors que la géographie nécessite des structures hiérarchisées; les liens sémantiques doivent être recréés avec le mécanisme de contraintes d'intégrité et l'accès aux données est coûteux du fait des jointures. De plus, les langages de manipulation des données relationnelles (SQL par exemple) n'assurent généralement pas la complétude et doivent par conséquent être immergés dans les langages de programmation plus classiques. Il y a donc là aussi problème de dysfonctionnement qui apparaît au niveau du programmeur et du système [DELOBEL 91].

Une troisième approche beaucoup plus récente consiste à bâtir le SIG autour d'un SGBD orienté-objet. On hérite ainsi de tous les bénéfices de l'orienté-objet, tels que l'identité d'objet, la gestion d'objets complexes, l'héritage de propriété et les mécanismes de méthodes.

Cependant, si l'architecture d'un SGBDOO semble a priori mieux adaptée, il est de toute façon nécessaire d'étendre le SGBDOO à la gestion des données spatiales. Il faut donc ajouter à sa structure de base les types de données spatiales (ie : les points, les lignes et les surfaces), de même que les fonctions (union, distance...) et prédicats associés (adjacence, chevauchement...) doivent être ajoutés au niveau du langage de requête.

#### 4.1.2.2 Activité / Résultats

L'action de recherche présentée ici est destinée à tester l'adaptabilité d'un SGBDOO à la gestion des données géographiques. Elle est bâtie sur O2 et ne traite dans un premier temps que de la partie modélisation, sans aborder les aspects interrogation et traitements.

Le modèle GéO2 est issu des recherches présentées dans le rapport précédent (section 4.1.1) mais correspond à une version préliminaire du modèle. Lors de la réalisation dans le prototype, le modèle est décomposé en une partie invariante et une partie variante. La partie invariante concerne tout ce qui est commun à tout type d'information géographique tandis que l'ensemble des spécificités liées à une classe d'objets géographiques constitue la partie variante du schéma.

Ainsi, la géométrie, étant une propriété de l'objet, constitue la quasi totalité de la partie invariante. En revanche, la structure des faits dépend des données géographiques traitées et constitue la partie variante du modèle.

##### Partie invariante du modèle

Dans le schéma géométrique, nous avons cherché à construire un modèle unique permettant d'implémenter les différentes structures de données (spaghetti, topologie...) susceptibles d'être utilisées dans les SIG. Un des objectifs est de pouvoir utiliser facilement l'une ou l'autre de ces structures de données et de rendre transparent ce choix en utilisant le mécanisme d'héritage, les primitives les plus complexes héritant des primitives les plus simples.

Le schéma géométrique décrit d'une part les primitives géométriques et d'autre part les couches qui définissent l'organisation des primitives. Une couche est de type spaghetti, réseau ou carte topologique. A chaque type de couche correspond une classe et une organisation des données à l'aide des primitives géométriques.

Les primitives géométriques permettent de décrire les figures de la géométrie classique telles que les points, les lignes et les surfaces. En effet, la typologie classique des données géographiques est définie par la dimension de leur représentation spatiale [WHITE 79]. Cette typologie distingue les données ponctuelles (associées à un point), les données linéaires (associées à une ligne) et les données surfaciques (associées à une surface).

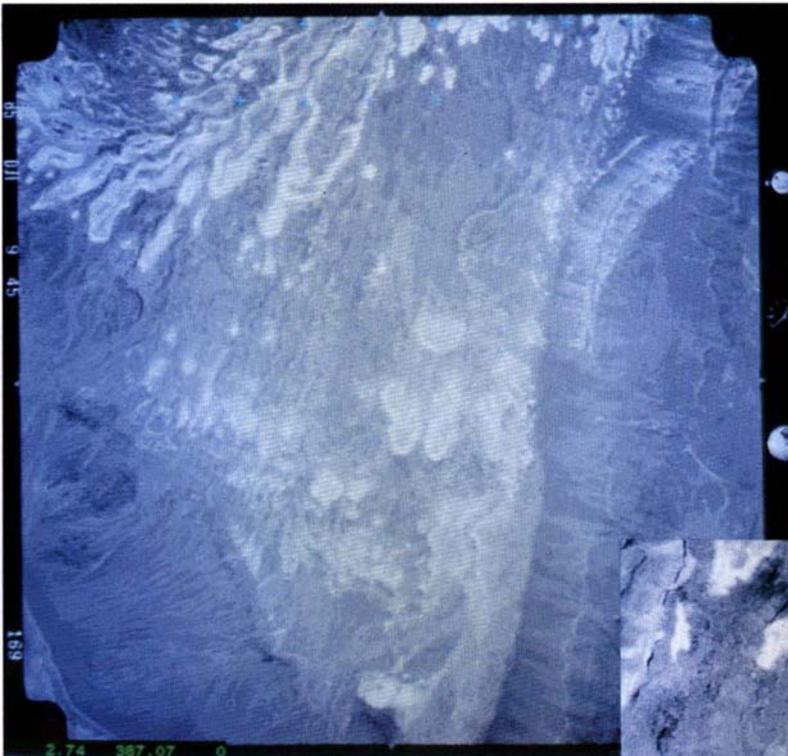
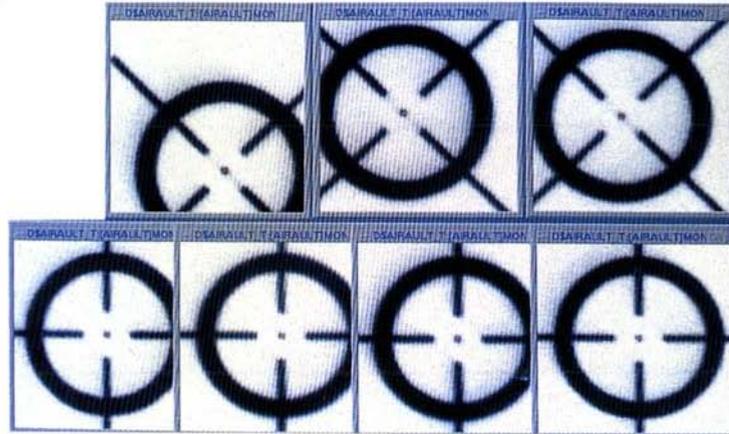
Lorsque la couche est de type spaghetti, les primitives géométriques se limitent au stockage des coordonnées. La classe Point définit un couple de coordonnées. La classe Line permet de décrire une ligne brisée et définit pour cela une liste de couples de coordonnées. Cette liste peut être implémentée de différentes manières : en utilisant le constructeur liste appliqué au type point (classe Lpt), en compactant les points (classe Vpt), en référençant une autre liste qui stocke les coordonnées dans l'ordre inverse (classe Inv) ou en référençant une liste de lignes (classe Llpt). Par ailleurs, la classe SimpPoly décrit un polygone simple alors que la classe CompPoly décrit un polygone complexe, c'est à dire contenant un nombre quelconque de trous, chacun défini comme un polygone simple. Toutes ces primitives géométriques héritent de la classe Figure qui supporte les méthodes qui peuvent être appliquées à n'importe quelle figure géométrique. Enfin, la classe Rect définit l'emprise de n'importe quelle figure.

Lorsque la couche est de type réseau ou carte topologique, les primitives sont des primitives topologiques et permettent d'organiser l'information en un graphe composé d'arcs et de noeuds. La



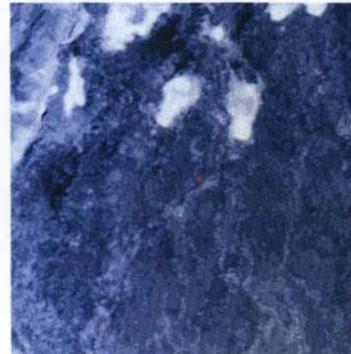
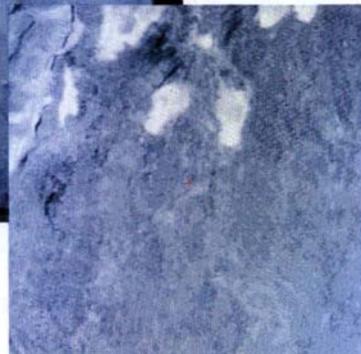
**Orientation interne d'un cliché :**

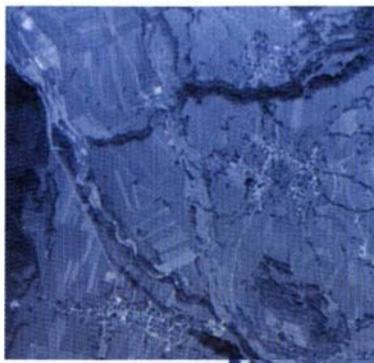
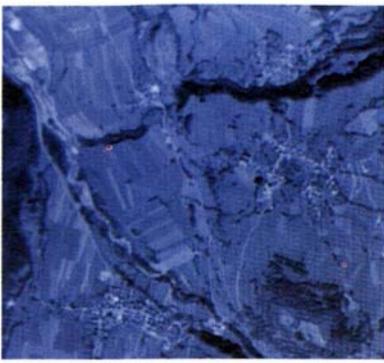
Aide au pointé des repères de fond de chambre : le premier repère est désigné manuellement. Les positions des repères suivants sont calculées automatiquement par corrélation avec le premier.



**Orientation relative d'un couple :**

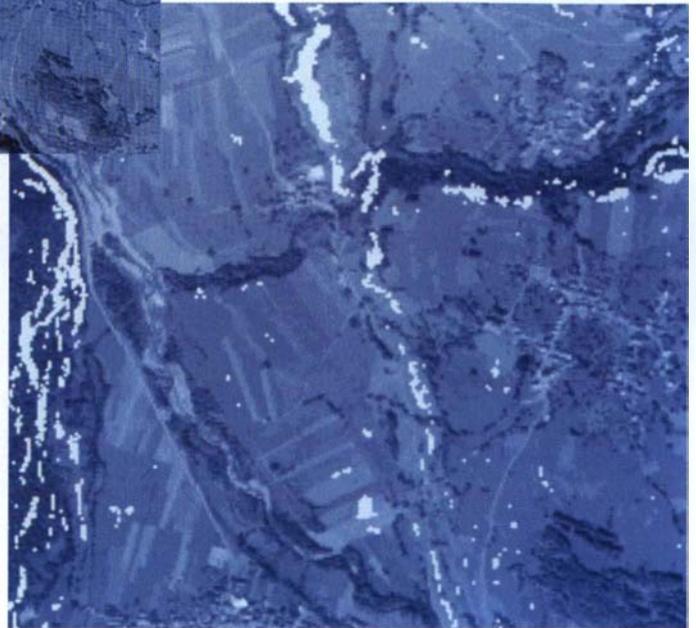
Les points homologues (croix bleues en haut du cliché de gauche) sont calculés automatiquement par corrélation automatique, sur une grille régulière couvrant l'ensemble du couple. Les extraits des deux images du couple (ci-dessous) illustrent le calcul de la corrélation (position des homologues marquée par une croix rouge).





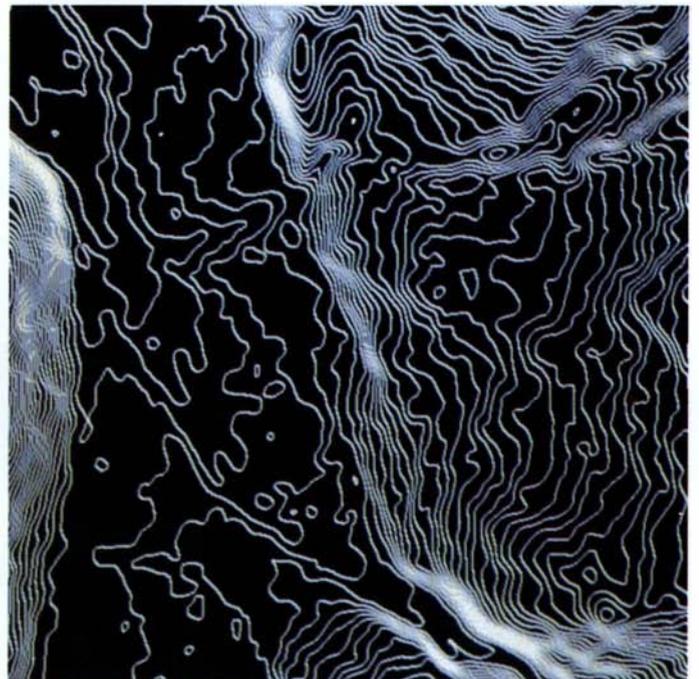
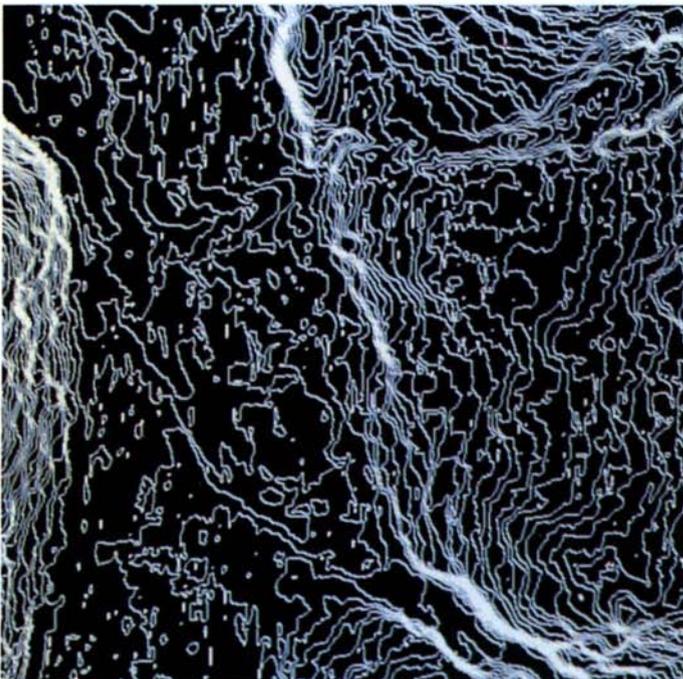
**Corrélation automatique appliquée à la génération d'un MNT (1).**

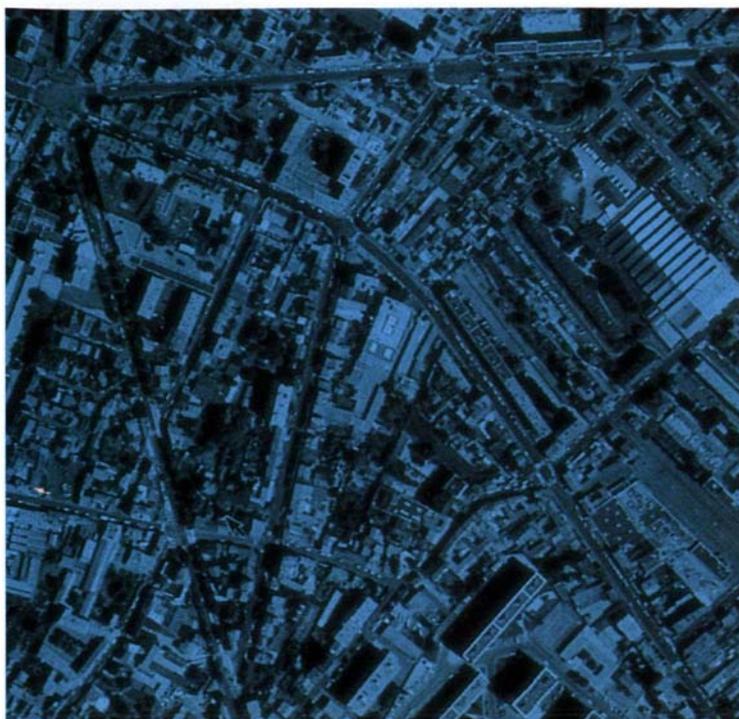
En haut, le couple stéréoscopique. En bas, un écran de contrôle sur lequel sont affichés les points corrélés au fur et à mesure qu'ils sont trouvés. Les zones blanches correspondent aux pixels non encore appariés.



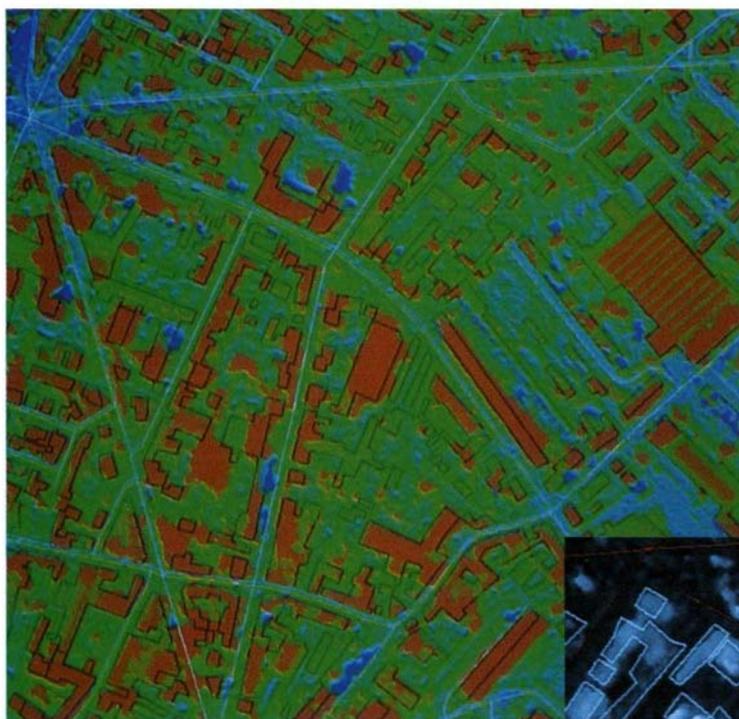
**Corrélation automatique appliquée à la génération de MNT (2).**

Les courbes sont générées par calcul sur le MNT dérivé du résultat de l'appariement. L'algorithme d'interpolation utilisé pour combler les zones non appariables permet d'imposer des contraintes de régularité (grille élastique de Masson d'Autume) : à gauche, les courbes sont calculées après interpolation sans contrainte (résultat brut de corrélation) ; à droite, les courbes sont calculées après une interpolation imposant une régularité suffisante au relief pour assurer une bonne lisibilité des courbes.

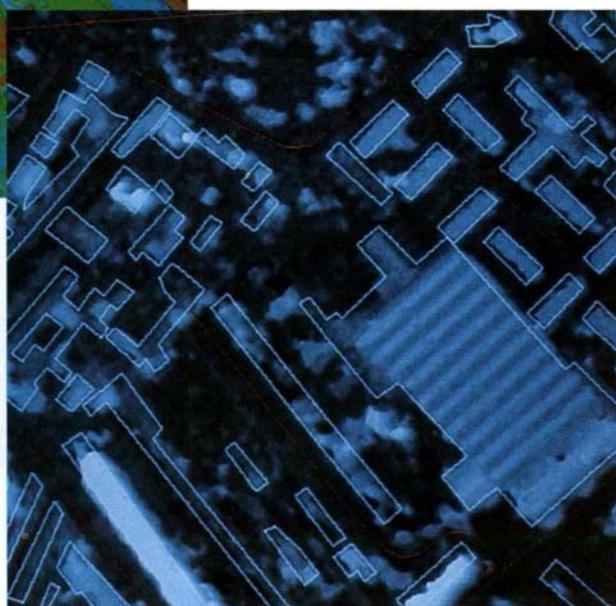




**Corrélation automatique en zone bâtie (1).**  
Prise de vue aérienne à l'échelle du 1 : 20 000. Cliché gauche du couple utilisé : banlieue est de Paris (Montreuil).



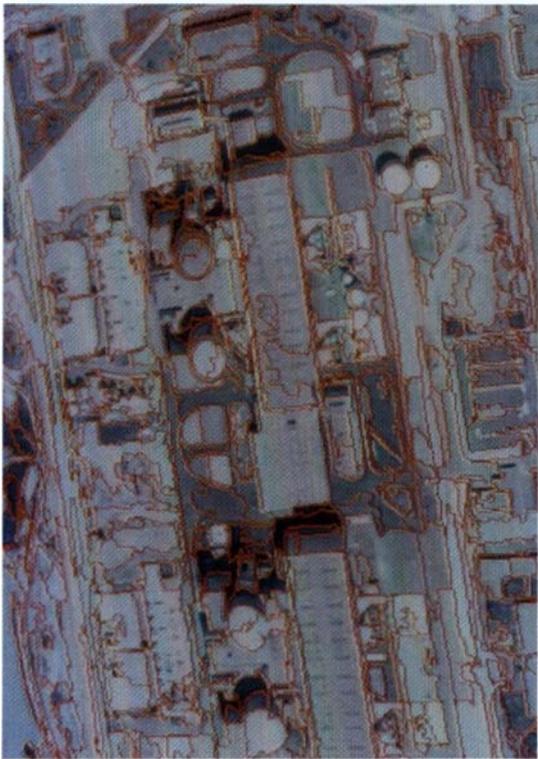
**Corrélation automatique en zone bâtie (2) : résultat brut.**  
Le relief est présenté en teintes hypsométriques (les zones les plus élevées en rouge).  
En blanc : axes routiers (BD Topo).  
En noir : bâtiments (BD Topo).



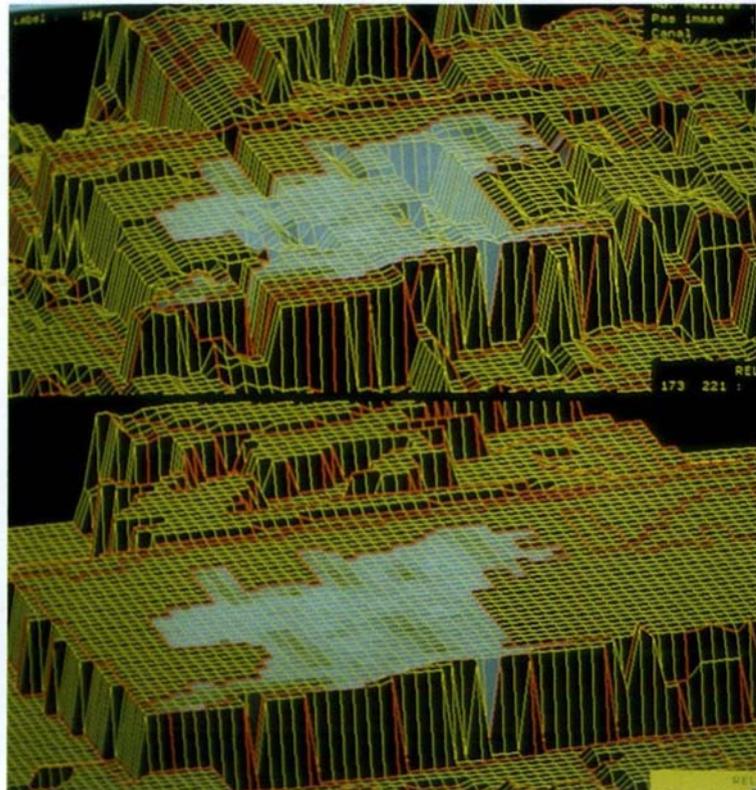
**Résultat brut de la corrélation (détail) :**  
Le relief est représenté en teintes de gris.  
En rouge : axes routiers (BD Topo).  
En blanc : bâtiments (BD Topo).



Couple stéréoscopique de photographies aériennes numérisées.  
(centrale EDF du Blayet, résolution métrique, géométrie épipolaire).

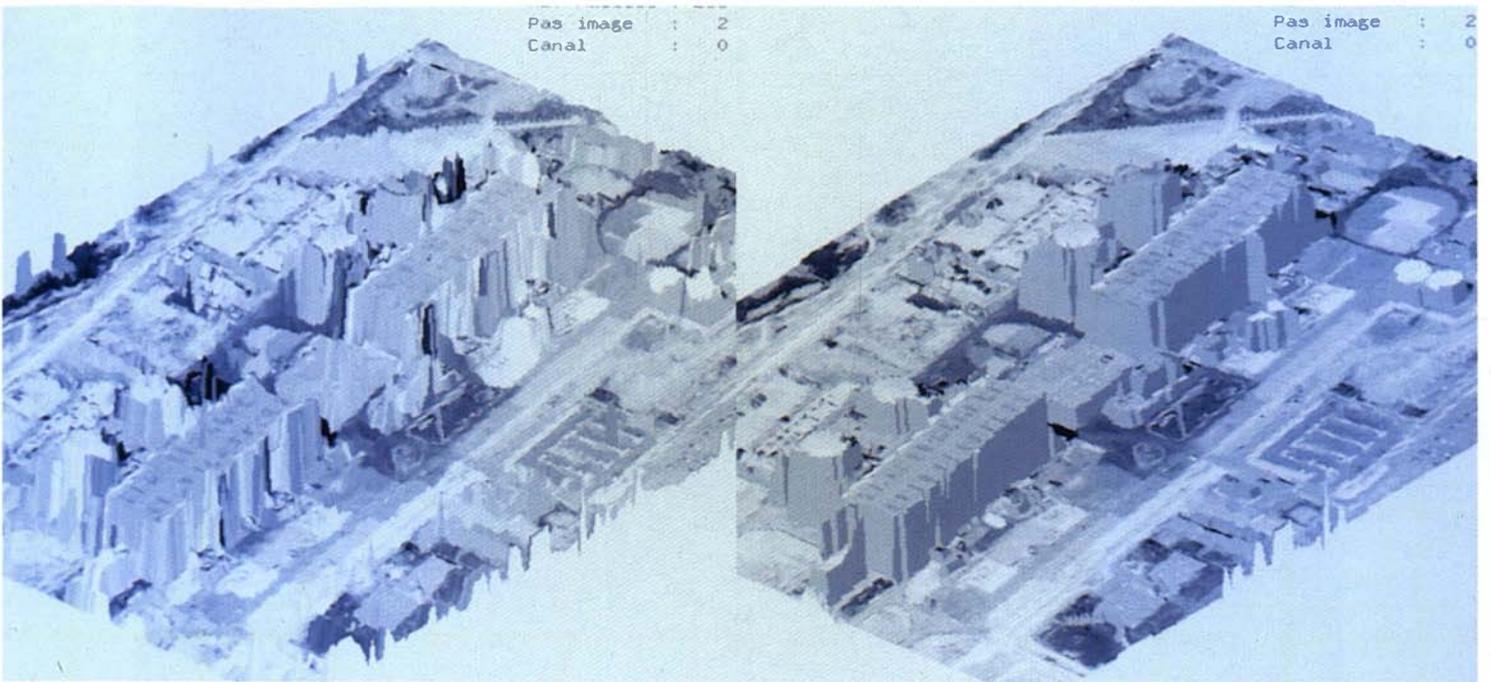


Segmentation automatique de l'image gauche.



Lissage des parallaxes par un modèle de surfaces :  
Les régions de la segmentation sont traitées indépendamment les unes des autres.

# RESTITUTION AUTOMATIQUE DES BÂTIMENTS

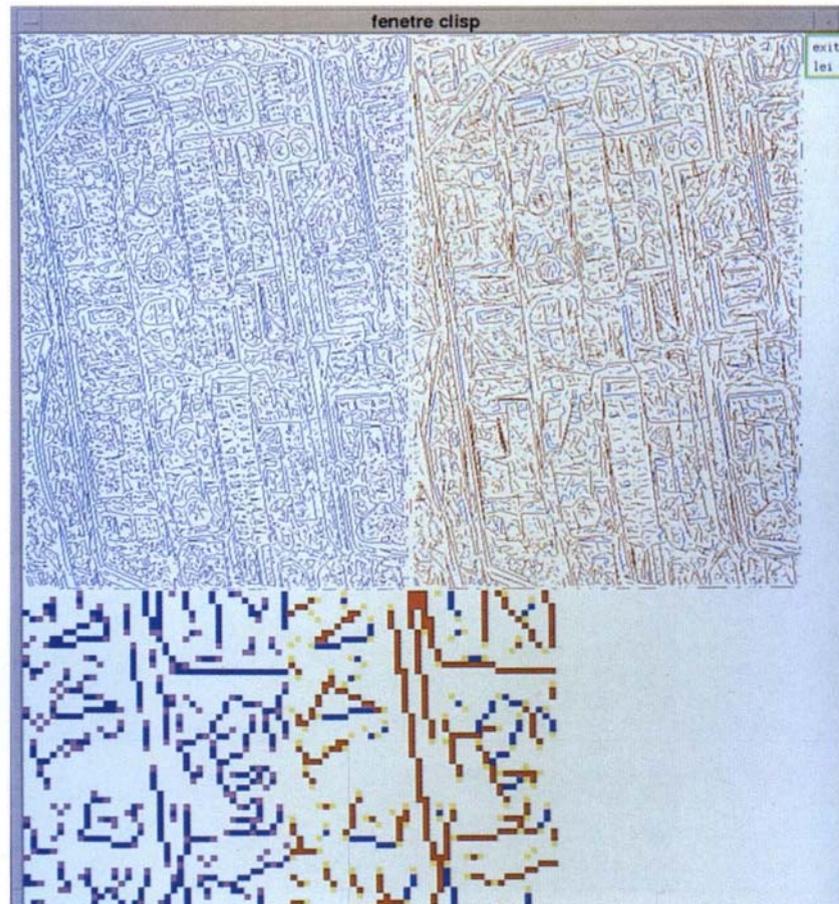


Résultat du traitement sur l'ensemble du couple (à gauche, corrélation point à point, à droite, application des modèles de surface).



**Détection des ombres :**  
les ombres détectées permettront la validation du modèle de bâtiment calculé (recherche 93).

**Groupements perceptuels :**  
la géométrie grossière du bâti étant calculée, une reconnaissance de formes caractéristiques (droites, angles...) permettra de filtrer les erreurs de segmentation (recherche 93)  
en bleu : segments détectés ; en rouge : droites issues du regroupement automatique de segments.

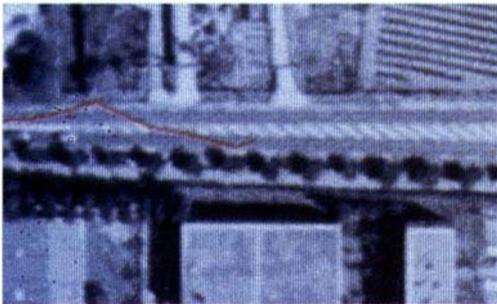


# SUR COUPLE DE PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES

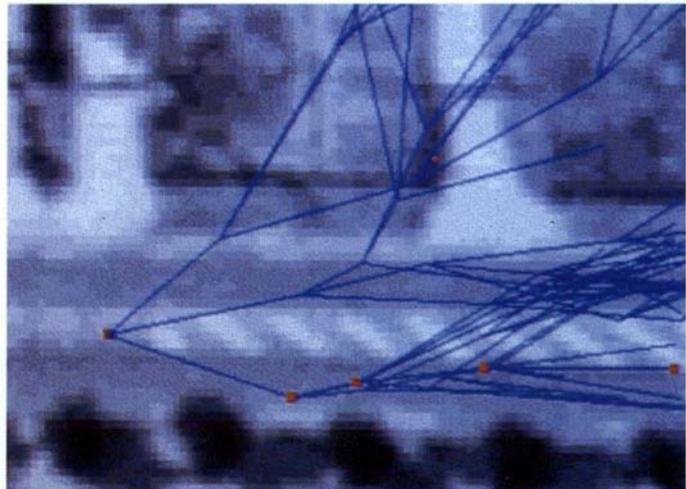


Logiciel d'étude pour le suivi de route automatique.

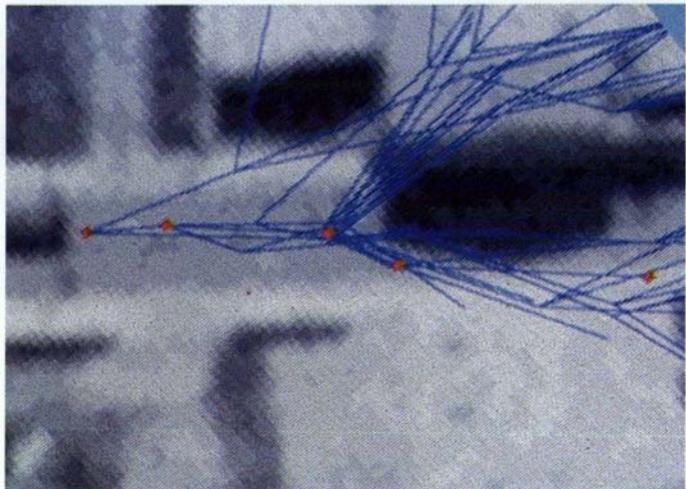
Deux exemples du comportement du suivi de route face à des obstacles.



Cas d'une route avec marquage au sol.



Cas d'une route partiellement masquée par une ombre.



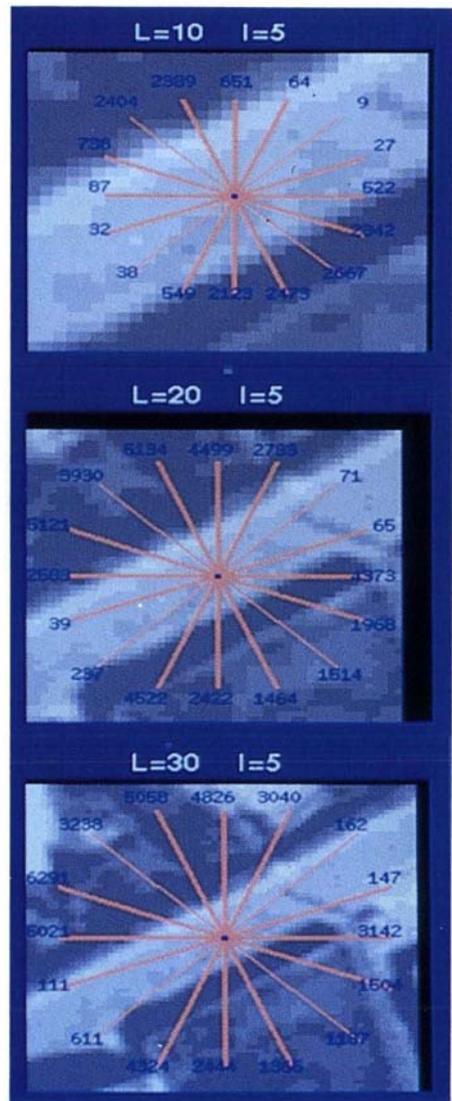
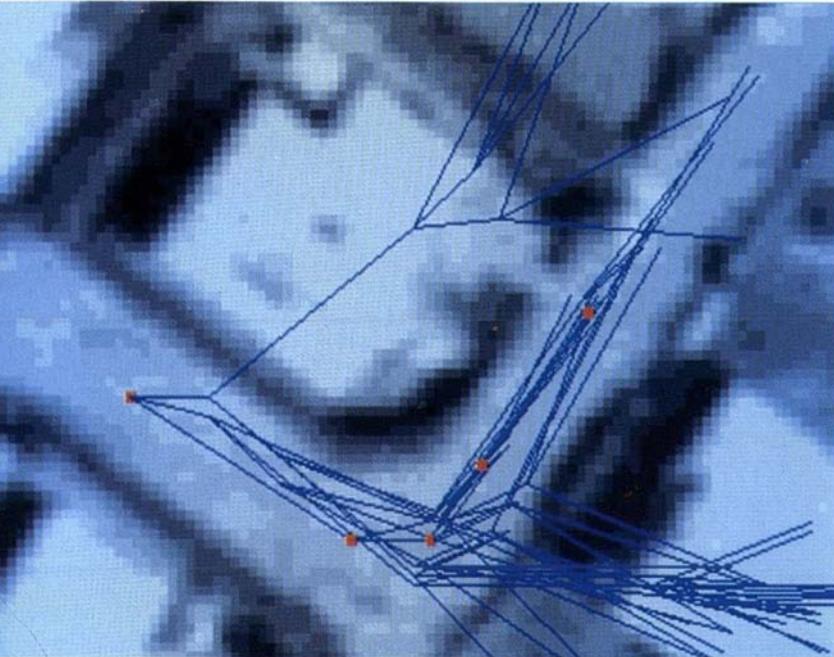
## EXTRACTION AUTOMATIQUE DU RÉSEAU

**Mesures d'homogénéité  
le long d'une route.**

La minimisation des variances sur des voisinages de longueur, de largeur et d'orientation variables ( $L = 10-30$  pixels,  $l = 1-9$  pixels) est la condition essentielle utilisée par l'algorithme de suivi de route.

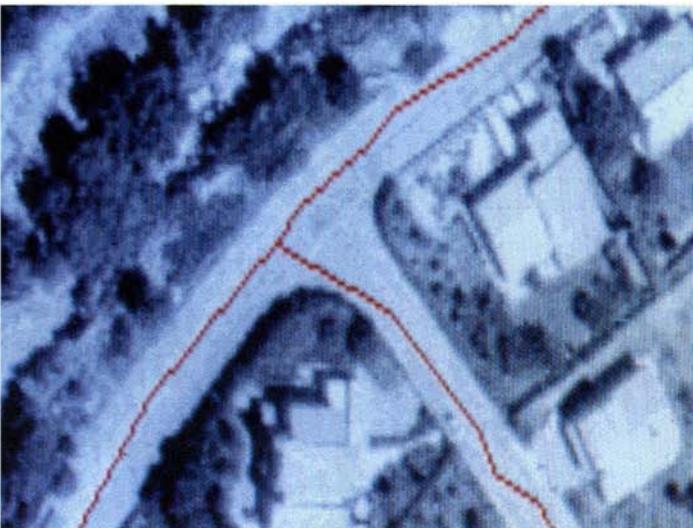
**Franchissement d'un angle droit.**

Les contraintes sur la courbure de la route sont relâchées afin de pouvoir traiter tous les cas de figures.



**Deux représentations du même carrefour.**

La géométrie est imprécise mais l'information topologique permettra un recalage global a posteriori sur les axes de routes.



**Image de "confiance dans la géométrie détectée".**

L'analyse locale des profils radiométriques au cours du suivi de routes fournit un indicateur sur l'importance des discontinuités radiométriques qui rend bien compte de la qualité du recalage qui a été effectué. Ces indicateurs de confiance sont visualisés ici avec une fonction périodique après convolution avec une gaussienne (avec superposition de données vecteurs : en bleu, la détection lissée ; en rouge, la référence BDtopo).



Détection brute



Détection lissée

**Lissage des axes de routes issus du suivi automatique.**

La méthode utilisée est inspirée des algorithmes de contours actifs. On cherche à minimiser sur un tronçon de route des contraintes internes liées aux connaissances que l'on a de la forme générale des routes et des contraintes externes provenant de mesures de confiance effectuées pendant le suivi.

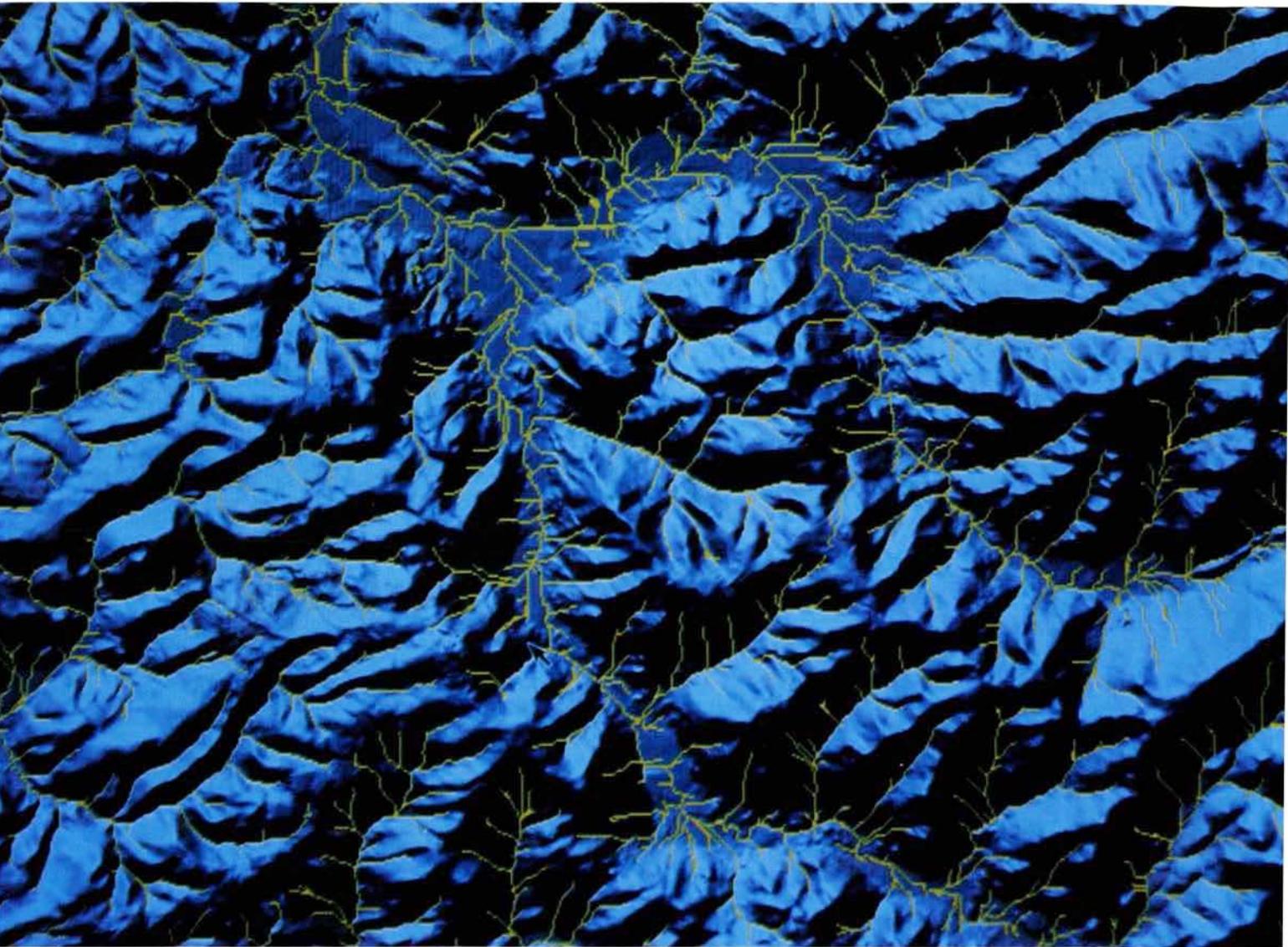


Saisie manuelle BD topo

# EXTRACTION AUTOMATIQUE DU RÉSEAU ROUTIER SUR PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES

**Algorithme de LE MEN.**

La détection calculée sur le MNT à pas de 40 m de la zone de Remiremont est ici représentée en jaune sur le relief en estompage : les éléments de détection correspondent à des thalwegs effectivement représentés dans le MNT et sont correctement positionnés.



**EXTRACTION AUTOMATIQUE DU RÉSEAU  
HYDROGRAPHIQUE SUR MNT**

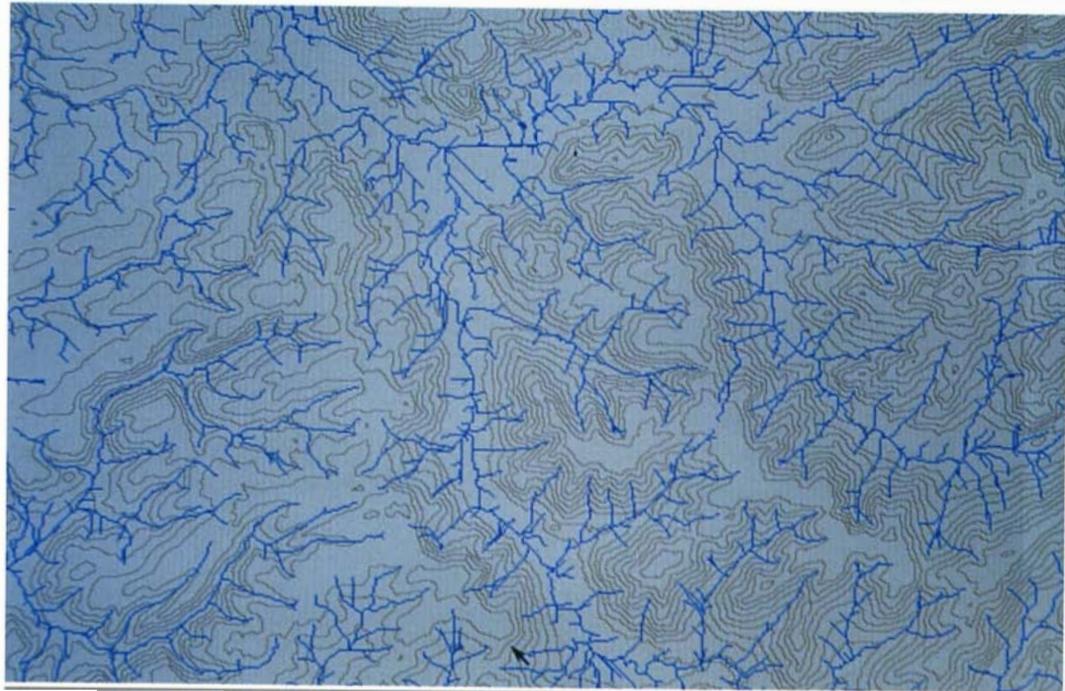
**Algorithme de RIAZANOFF.**

Réseau détecté (en bleu) sur un MNT (courbes de niveau en brun) à pas de 40 m couvrant la zone de Remiremont (Vosges, France) : la détection devient difficilement exploitable dans les zones de faible pente.



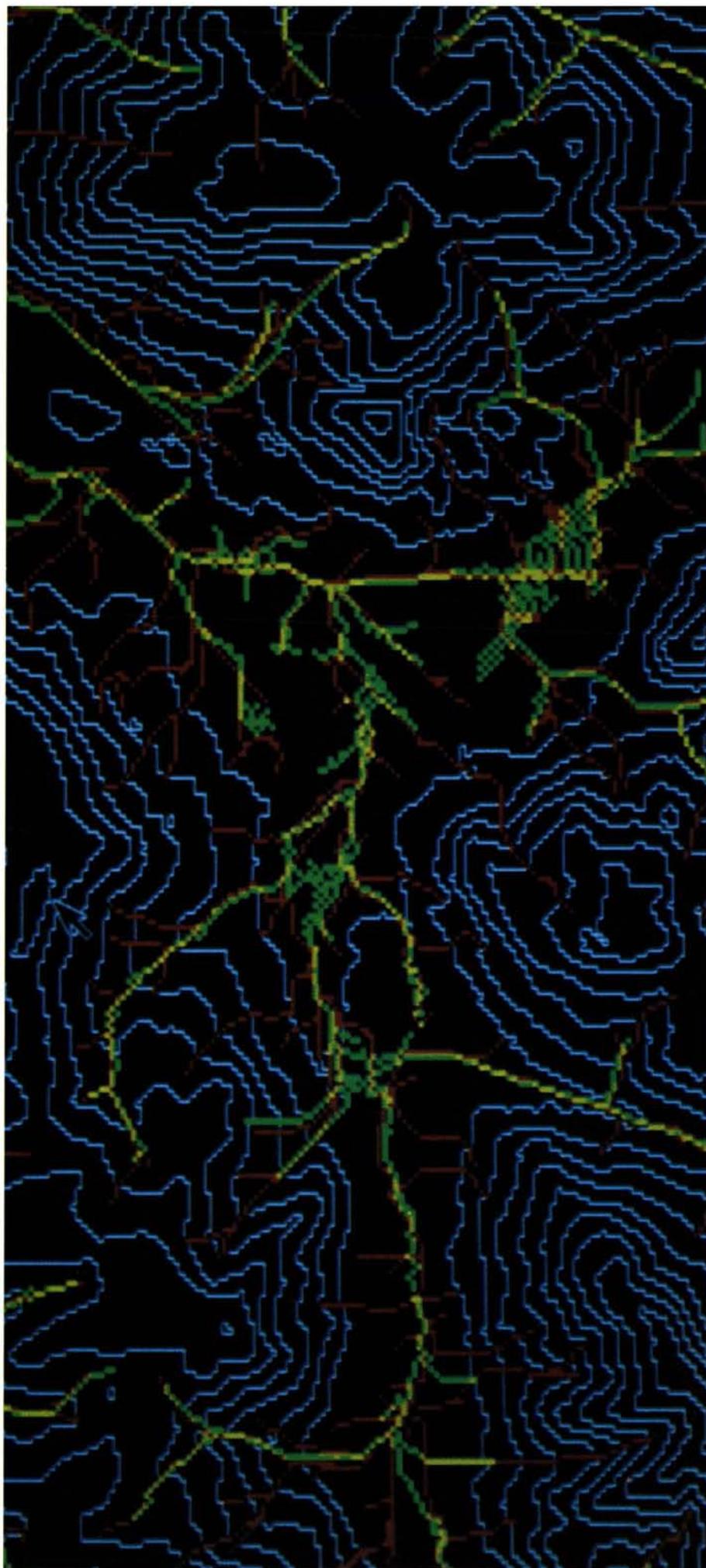
**Algorithme de LE MEN.**

Le réseau détecté par l'algorithme de LE MEN (même zone) présente plus de branches secondaires, mais conserve une structure d'arbre dans les zones de faible pente.



**Comparaison des Algorithmes  
de RIAZANOFF et de LE MEN.**

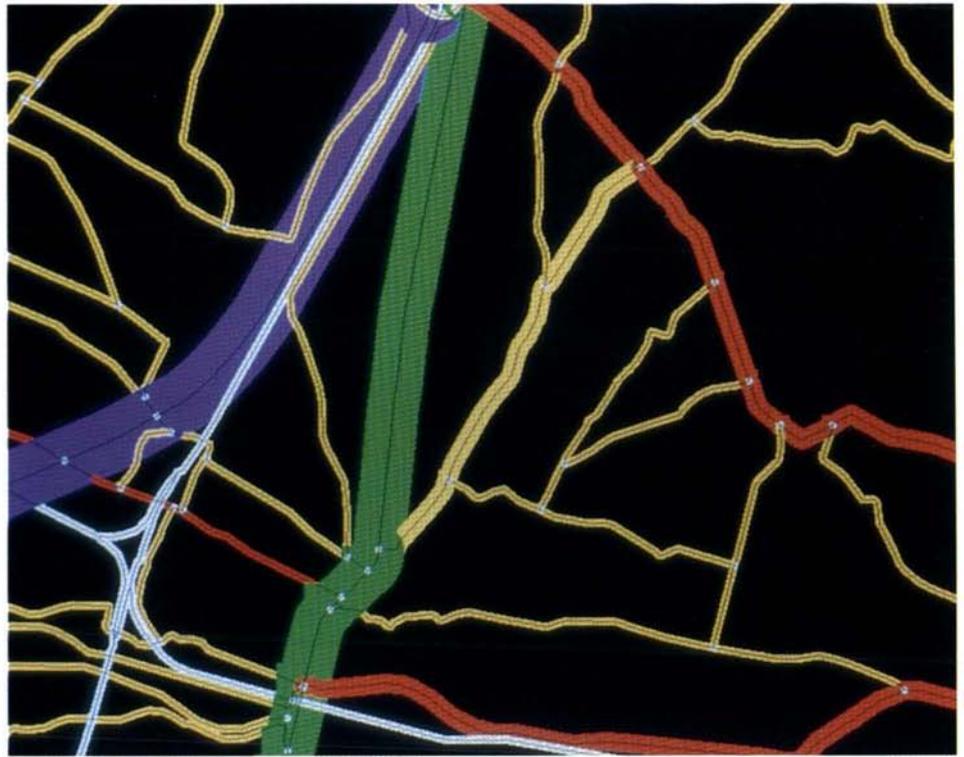
La superposition des deux  
résultats de détection montre  
leur cohérence géométrique (en  
bleu, courbes de niveau ; en  
vert, détection de RIAZANOFF ;  
en rouge, détection de LE MEN ;  
en jaune, les parties communes  
entre les deux résultats).





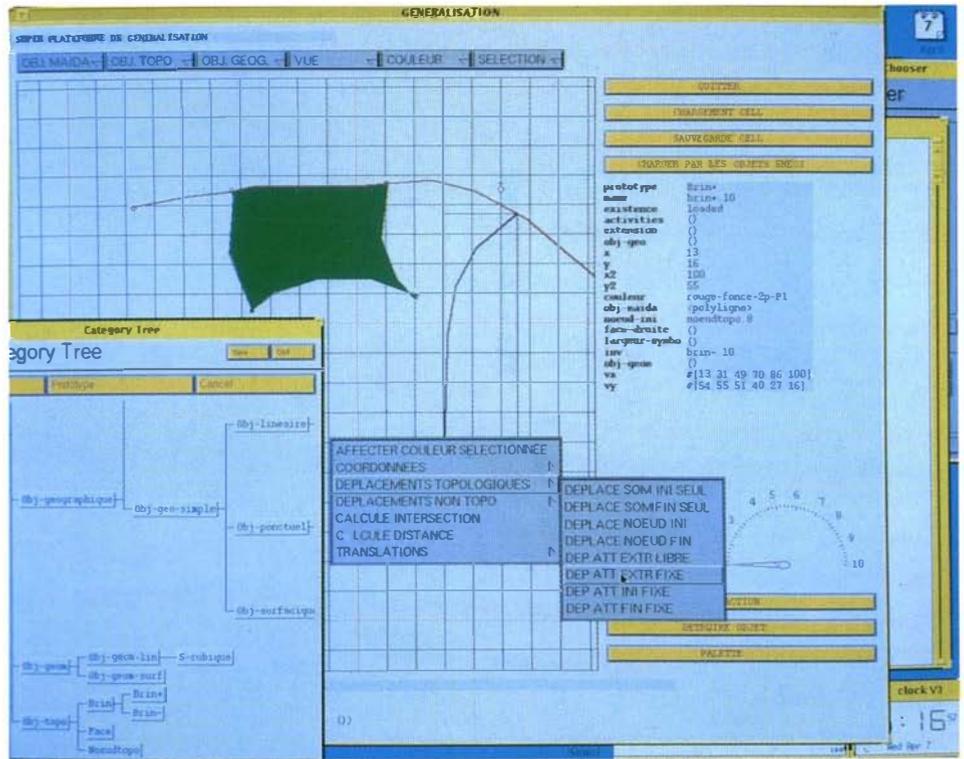
**Plate-forme de généralisation.**

Affichage de données de la BD Corto rédigées avec une symbolisation du 1:250000 et visualisation de problèmes de généralisation (ici superposition de routes).



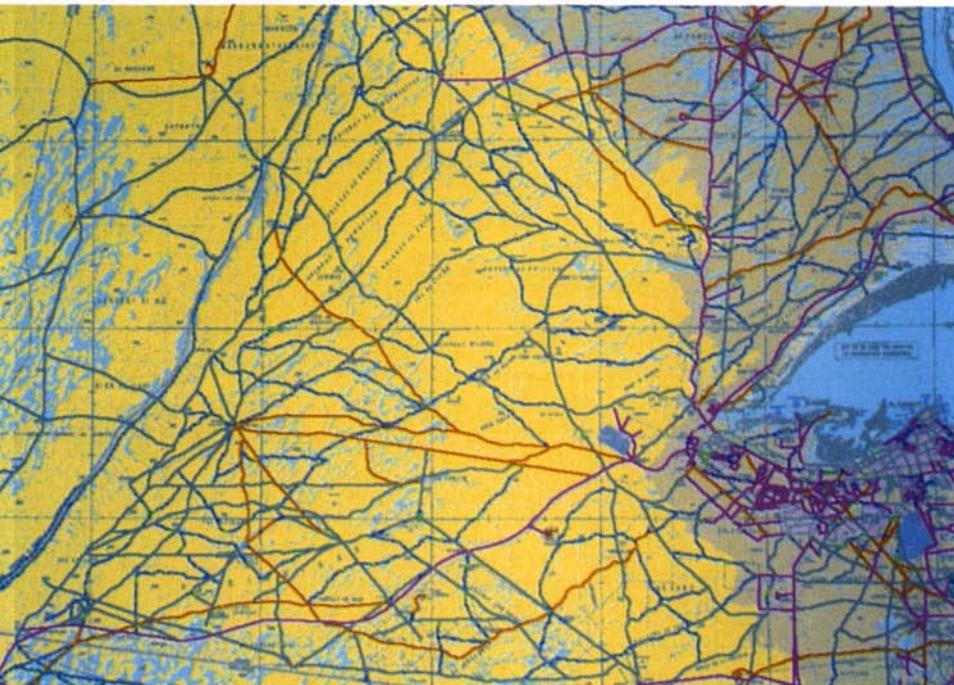
**Système expert pour la généralisation.**

Recherche de modélisation des données et des règles adéquates pour l'identification et la résolution des conflits dus aux changements d'échelle.



← **Placement automatique des toponymes.**  
Ce positionnement des noms de ville, réalisé sur une carte au 1:1000000, tient compte du fond cartographique. 80 à 90 % des noms sont placés avec une bonne qualité cartographique.

**G É N É R A L I S A T I O N  
C A R T O G R A P H I Q U E**



**Extraction automatique du réseau routier sur carte scannée.**

Le réseau extrait automatiquement est surligné en trait épais. Les couleurs affectées au réseau reprennent les types de routes reconnues (carte du Koweït à l'échelle du 1 : 250000).



**Extraction automatique du réseau routier sur carte scannée (détail) :**

- en magenta, brun et gris, les détections effectuées en première passe par des opérateurs de bas-niveau.
- en bleu, les compléments apportés par application d'une règle de connexité.
- en vert, les compléments apportés par fermeture des cycles sur un critère de longueur maximale du chemin joignant deux points du réseau.

structure topologique de GÉO2 s'appuie sur la théorie des cartes topologiques telle que définie dans [DAVID 91]. Un noeud correspond à un point, il est décrit par la classe Node qui hérite de la classe Point. D'autre part, conformément à la théorie des cartes topologiques, les arcs sont divisés en deux brins correspondant chacun à une orientation possible de l'arc. Les brins positifs correspondent à l'orientation positive et sont décrits par la classe DartPos qui héritent de la classe Vpt. Les brins négatifs sont décrits par la classe DartNeg et leur géométrie est définie par le brin positif qui leur est associé, la classe DartNeg hérite de la classe Inv.

La distinction entre une couche de type réseau et une autre de type-carte topologique provient de la gestion des primitives surfaciques. Dans un réseau, le graphe peut ne pas être planaire et les faces du graphe ne sont donc pas définies. La primitive surfacique, appelée domaine, est alors décrite par son périmètre, lui-même défini par une liste de brins positifs ou négatifs. Le domaine est défini par la classe SimpDomain s'il ne peut pas comporter de trous et par la classe CompDomain dans le cas inverse. Un brin étant en fait une ligne, les classes SimpDomain et CompDomain héritent respectivement des classes SimpPoly et CompPoly.

Dans une carte topologique, un noeud est créé lorsque deux arêtes s'intersectent. Le graphe ainsi construit est donc systématiquement planaire et les faces sont donc toujours définies. La primitive surfacique est alors la face du graphe définie par la classe Face. Conformément à la théorie des cartes topologiques, une face est soit une zone (classe Zone) soit un trou (classe Hole). Une face étant en fait un polygone, la classe Face hérite de la classe SimpPoly, de même la classe Zone hérite de la classe CompPoly.

Chaque couche stockée dans le système correspond à un objet et chaque type de couche correspond donc à une classe. Ces classes héritent toutes de la classe RefCoord qui définit le système de référence de coordonnées c'est-à-dire le type de projection utilisé, les coordonnées du point origine de la carte, et le coefficient par lequel il faut multiplier les coordonnées pour avoir des mètres.

La classe Spaghetti modélise une couche de type spaghetti. Elle hérite de la classe RefCoord, car tous les points sont définis dans un système de référence. Chaque élément est stocké indépendamment des autres. Les entités géographiques de la carte sont décrites seulement géométriquement par des points, des lignes et des polygones contenant éventuellement des trous. Une entité linéaire (route, fleuve) est représentée par des objets de la classe Vpt. Une entité ponctuelle (carrefour, château d'eau) est représentée par des objets de la classe Point qui gère tous les points isolés et les sommets existants de la carte. Une entité surfacique (forêt, clairière) est représentée par des objets de la classe CompPoly.

Les couches de type réseau sont définies par la classe Network pour laquelle il existe des relations topologiques entre les entités ponctuelles et les entités linéaires de la carte. Les entités surfaciques n'ont pas de relations topologiques (on ne peut pas obtenir la face à droite d'un arc). En revanche, on peut définir des domaines qui s'appuient sur des brins (ces domaines peuvent regrouper plusieurs faces). Seul, le périmètre de la surface est géré topologiquement. La classe Network hérite de la classe Spaghetti.

La classe Map modélise une carte topologique avec les arcs, les noeuds et les faces. La classe Map hérite de la classe Network.

Enfin, nous avons vu qu'il existe, dans un schéma géographique, plusieurs niveaux d'information. L'objet spatial directement relié à l'objet géographique constitue la partie invariante du modèle. En effet, qu'il s'agisse d'une route ou d'un cours d'eau, l'objet spatial ligne ne change pas pour autant de caractéristique ni de comportement du point de vue de la géométrie.

Dans notre modèle, il existe des types d'entités géographiques prédéfinies dont hériteront les types des entités définies par l'utilisateur. Ces entités peuvent être de types ponctuel, linéaire et surfacique. Les classes PointS, PointNM, LineS, LineNM, SurfS, SurfN et SurfM ont été créées pour définir ces entités.

Un objet de la classe PointS (point d'une couche spaghetti) est composé d'un ensemble d'objets de la classe Point. Un objet de la classe PointNM (point d'une couche Network ou Map) est composé d'un ensemble d'objets de la classe Node. La classe PointNM hérite de la classe PointS.

Un objet de la classe LineS (ligne d'une couche spaghetti) est composé d'un ensemble d'objets de la classe Line. Un objet de la classe LineNM (ligne d'une couche Network ou Map) est composé d'un ensemble d'objets de la classe Dart. La classe LineNM hérite de la classe LineS.

Un objet de la classe SurfS (surface d'une couche spaghetti) est composé d'un ensemble d'objets de la classe CompPoly. Un objet de la classe SurfN (surface d'une couche Network) est composé d'un

ensemble d'objets de la classe CompDomain. Un objet de la classe SurfM (surface d'une couche Map) est composé d'un ensemble d'objets de la classe Zone. Les classes SurfN et SurfM héritent de la classe SurfS.

La figure 1 présente le schéma global de la partie invariante :

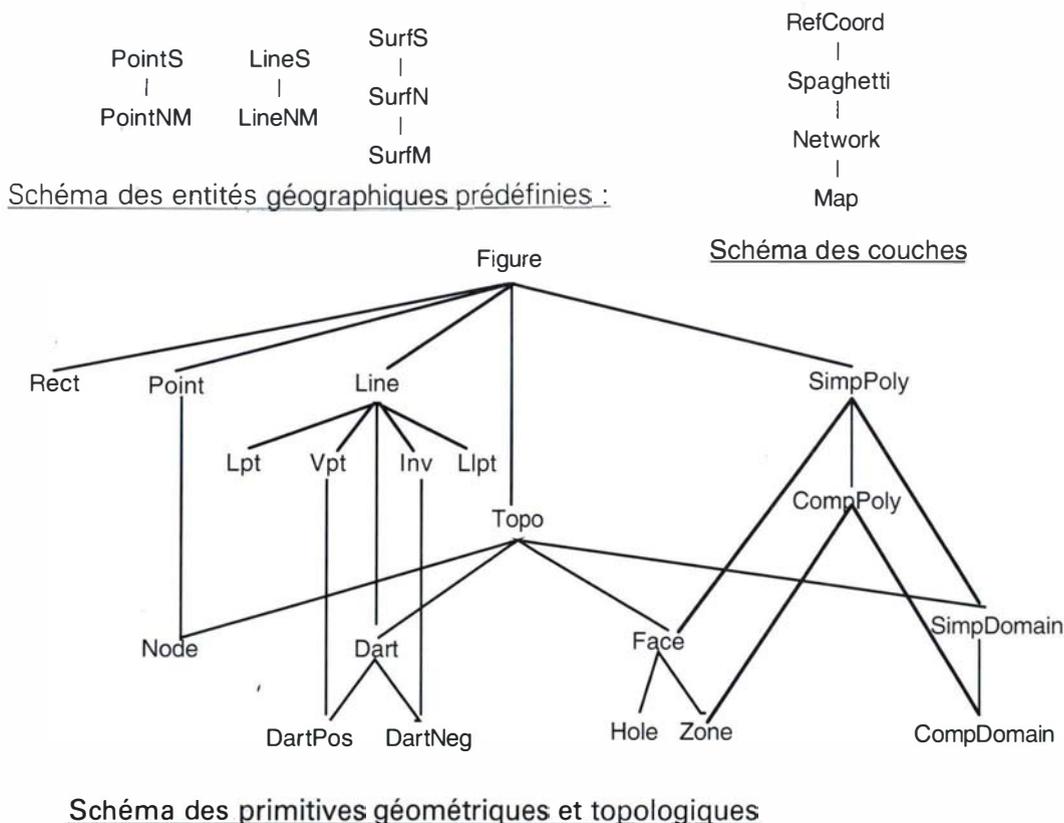


figure 1 : schéma de la partie invariante

#### Partie variante du modèle

Dans le modèle géographique, il existe des entités géographiques avec des attributs et des liens entre ces entités. De plus, les objets géographiques du monde réel se répartissent dans deux catégories : les entités simples et les entités complexes. Une entité complexe est composée d'un ensemble ou d'une liste d'entités simples. La composition (appelée aussi l'agrégation) consiste à regrouper différentes entités en une nouvelle entité de niveau supérieur. Par exemple, l'agrégation de plusieurs tronçons de route constitue une route. Contrairement à l'agrégation l'association ne construit pas de nouvelle entité mais relie entre elles plusieurs entités [DELOBEL 91]. Les relations entre les objets du monde réel sont décrites par une association; une association peut être d'ordre topologique ou d'ordre sémantique.

Le schéma géographique est stocké dans le dictionnaire de données de GéO2. Les entités sont stockées dans la classe EntityType et sont définies par un nom et une liste d'attributs. La classe CompType gère les types d'entités complexes, tandis que la classe SimpleType gère les types d'entités simples. Ces deux classes héritent de la classe EntityType.

La notion de lien de composition est utilisée pour décrire les entités localisées. Un type d'entité complexe est composé d'un ou plusieurs types d'entités simples ou complexes. Dans le dictionnaire de GéO2, les liens de composition sont stockés dans la classe CompLink et sont définis par un nom, une entité complexe, une entité simple et une liste de commentaires. Le lien de composition ne possède pas d'attributs.

Une association est plus complexe qu'un lien de composition : elle fait intervenir au moins deux rôles (un rôle étant soit un type d'entité soit une association), et elle peut porter des attributs (cf. figure 2).

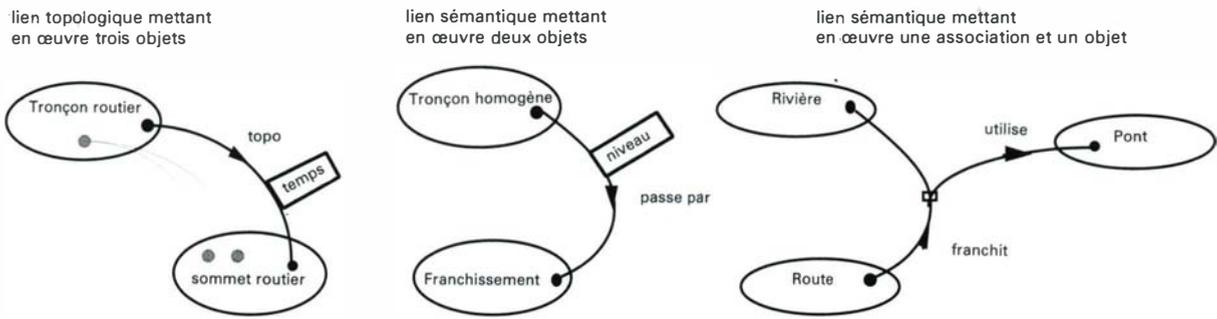


figure 2 : exemples d'associations

Dans le dictionnaire de Géo2, les associations sont gérées par la classe **RelType**. Elles sont définies par un nom, une liste de commentaires, une liste d'attributs et une liste de rôles. Chaque rôle est défini par un nom, un lien qui référence un type d'entité localisée ou une association, une liste de commentaires, et une cardinalité.

Un domaine de valeurs est l'ensemble des valeurs possibles d'un attribut. Dans le modèle de données choisi, la valeur associée à un attribut ne peut pas être un type d'entité, car la description d'une association par un attribut n'est pas autorisée. Ainsi la valeur d'un attribut sera soit atomique (integer, real, string, char, date et boolean), soit complexe c'est-à-dire obtenus à l'aide de constructeurs (tuple, list, set ou enum). Les domaines de valeurs sont stockés dans la classe **DataDomain**.

Un "tuple" est défini par une liste de noms dont chacun est associé à un domaine de valeurs. La classe **TupleDomain** représente ce domaine de valeurs. Une "list" ou un "set" sont définis par un domaine de valeurs. La classe **AggDomain** représente ce domaine de valeurs. Un "enum" est défini par une liste de noms et de commentaires. La classe **CodeDomain** représente ce domaine de valeurs. Les classes TupleDomain, AggDomain et CodeDomain héritent de la classe DataDomain.

Enfin, les données géographiques peuvent être réparties en plusieurs couches. Au sein d'une même couche, toutes les entités référencent les mêmes primitives géométriques; mais il n'y a pas partage de la géométrie entre deux entités de deux couches différentes. Chaque couche est décrite dans le dictionnaire par un objet de la classe **Couche** qui est définie par un nom, une liste de commentaires et un type (indiquant le type de la couche : Spaghetti, Network ou Map).

La figure 3 présente le schéma global du dictionnaire Géo2 :

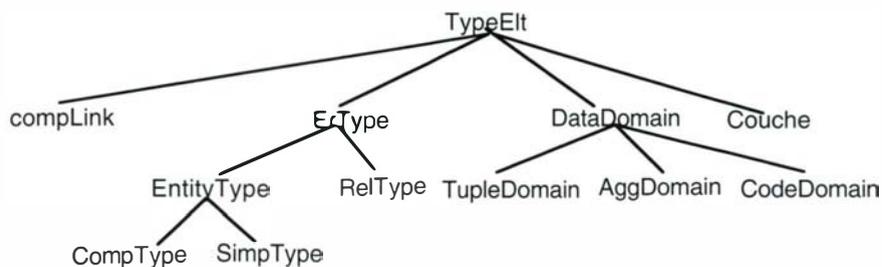


figure 3 : schéma du dictionnaire de Géo2

### Chargement d'un schéma et génération des classes O2

Le chargement s'effectue à partir de données dans le format FEIV<sup>1</sup>, le mécanisme serait identique si les données étaient dans un format similaire comme le format EDIGéO<sup>2</sup> par exemple. Le format FEIV contient sa propre description du format des données, il est donc possible d'extraire cette description et de la charger dans le dictionnaire de GéO2. La phase suivante consiste à générer, à partir de ce dictionnaire, le schéma des entités géographiques qui seront manipulées dans le système. Pour cela, un fichier contenant les ordres de création des classes dans la base de données est produit. Il s'agit d'une suite de commandes O2 dont un exemple suit :

```
create class Tronçon_Routier inherit LineNM
public type tuple (
    vocation : string,
    nb_chaussee : integer,
    nb_voies : integer,
    etat : integer)
end class;
```

Ce fichier de commandes est alors exécuté pour aboutir à la génération des classes O2, par exemple ici, la classe Tronçon\_Routier.

Le schéma de la figure 4 représente le synoptique de l'enchaînement des opérations depuis un lot FEIV jusqu'à la génération des classes O2.

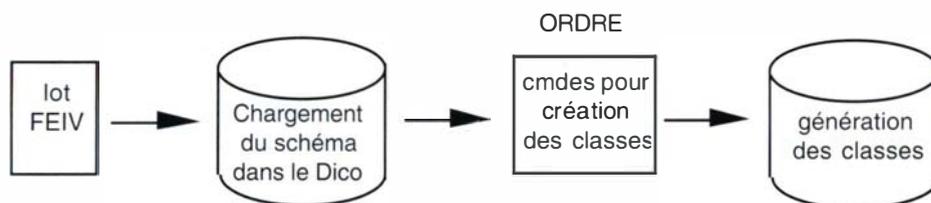


figure 4 : enchaînement des opérations de chargement

Une fois le schéma généré et pris en compte par le SGBD, la phase de chargement des données proprement dites peut débuter.

### **Conclusion**

L'étude entreprise nous a effectivement permis de tester et d'évaluer l'intérêt de l'orienté-objet et des SGBDOO pour la gestion de données géographiques. La conclusion est largement positive grâce à l'apport des notions d'objet complexe et d'héritage. L'utilisation des objets complexes nous a permis d'implémenter les concepts simples avec un minimum de classes. L'héritage intervient lui aussi largement dans la conception du modèle, ce qui permet d'assurer une bonne compréhension de l'architecture et donc une maintenance plus simple.

#### **4.1.2.3 Prolongements envisagés**

En 1993, ce prototype nous permettra de mener à bien différentes recherches. Tout d'abord il nous permettra d'évaluer différentes structures de données géographiques et différents algorithmes pour les traitements géographiques ce qui n'aurait pas été possible avec un S.I.G. dans lequel il ne serait pas possible de contrôler les structures de données.

D'autre part, nous pensons intégrer dans ce prototype le résultat de différentes recherches telles que celles sur la modélisation, la gestion de la précision et de l'historique.

Enfin nous évaluerons la possibilité de porter le prototype sur d'autres SGBD OO.

<sup>1</sup> Format d'Echange Interne Vecteur, défini et utilisé à l'IGN.

<sup>2</sup> Norme AFNOR pour l'échange des données géographiques.

#### 4.1.2.4 Références

- [DAVID 91] B. David : *Modélisation, représentation et gestion d'information géographique : une approche en relationnel étendu*, thèse de doctorat de l'Université Paris 6 - juillet 1991.
- [DAVID et al 92] B. David, L. Raynal, V. Mansart & G. Schorter : *GEO2, un modèle de données géographique avec O2*, journées AFCET, Versailles (F) - juin 1993.
- [DELOBEL 91] C. Delobel, C. Lécluse & P. Richard : *Bases de données, des systèmes relationnels aux systèmes objets*, InterEditions, 1991.
- [LARUE 92] T. Larue, D. Pastre & Y. Viéumont : *Intégration forte d'opérateurs spatiaux dans un langage de requêtes relationnel étendu*, in Actes de SIG/GIS, Paris (F), 1992.
- [MEYER 90] B. Meyer : *Conception et programmation par objets, pour du logiciel de qualité*, traduction française, InterEditions, 1990.
- [STROUS 89] B. Stroustrup : *Le langage C++*, traduction française, InterEditions, 1989.
- [WHITE 79] M. White : *A Survey of the Mathematics of Maps*, Proc. of Auto-Carto IV, pp. 82-96, 1979.

#### 4.1.3 Etude des problèmes de précision

par Philippe RIGAUX

##### 4.1.3.1 Contexte - Objectifs

Le travail réalisé en 1992 a essentiellement consisté à établir la bibliographie relative au sujet afin de dresser un "état de l'art", étape préalable indispensable avant d'entamer une recherche plus approfondie et plus concrète. Cette bibliographie est fournie à la fin du rapport.

Ce rapport est donc surtout l'occasion de présenter de façon ordonnée les domaines concernés par le sujet, et de montrer comment je me propose d'en dégager une voie d'approche, en sélectionnant des processus et des types de données fondamentaux qui serviront de base à des premiers travaux concrets.

Il est peut-être important, avant la présentation du plan de l'exposé, de préciser les deux aspects essentiels du sujet :

En premier lieu, il s'agit d'associer aux informations d'une BD géographique des données décrivant leur exactitude, c'est à dire l'écart qu'elle peuvent présenter par rapport à la réalité terrain.

En second lieu, il faudrait élargir le terme "BD" et parler de "SGBD", ce qui introduit la notion de **gestion** de l'exactitude. Un SIG a pour rôle non seulement de stocker les données, mais également de fournir l'information à un utilisateur, en réalisant éventuellement les opérations suivantes :

- mise en forme (exemple : sortie graphique),
- transformation (changement d'échelle, vecteur/raster),
- combinaison de plusieurs types d'information (superposition de couches).

Dans le cadre de cette recherche, un des principaux objectifs serait donc d'intégrer à un SIG un module de "gestion de l'exactitude" afin de pouvoir fournir à l'utilisateur un ou plusieurs indicateurs de qualité lui permettant d'évaluer la fiabilité de réponse. Cela passe par une modélisation de l'erreur et de sa propagation.

Cet exposé commence par un survol rapide de l'ensemble des problèmes liés à l'exactitude dans les BD géographiques. On peut les répartir en trois grands domaines :

##### - Identification et classification des erreurs

Un standard a été proposé aux Etats-Unis et repris dans le document qualité de l'IGN. Les composantes de la qualité relatives à l'exactitude sont illustrées par des exemples utilisant la superposition de couches et cette partie se termine par quelques remarques sur la classification ainsi établie.

#### - Détection et mesure de l'erreur

La mesure de l'erreur pose quelques problèmes généraux liés aux techniques statistiques utilisées. Je présenterai ensuite deux méthodes de détection et de mesure. La première, traditionnelle, étudie séparément chacune des composantes de l'exactitude en procédant par échantillonnage et analyse des résultats. La seconde, proposée récemment par CHRISMAN pour des jeux de données surfaciques, consiste à superposer deux couches et à étudier les écarts mis en évidence en tentant d'effectuer un classement.

#### - Modèles de propagation de l'erreur

C'est, en principe, la partie principale de ce travail de recherche puisqu'elle implique la définition d'un modèle de l'erreur géographique et sa mise en application dans les opérateurs des systèmes d'information. Les articles de la bibliographie ne traitent ce problème que de façon limitée et très spécifique. On se contentera donc de donner un exemple possible d'utilisation du modèle probabiliste et d'évoquer les problèmes que cela peut soulever.

En conclusion, les perspectives les plus prometteuses pour la suite du travail de recherche seront dégagées.

### **4.1.3.2 Activité / Résultats**

#### **A - Identification et classification des types d'erreur**

##### A1- Le standard

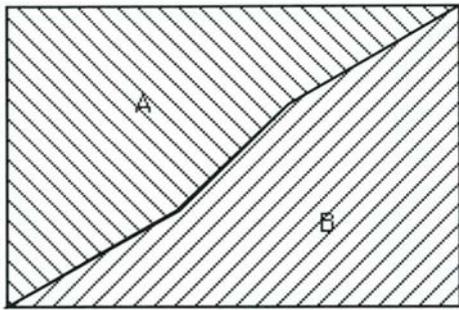
Il propose de distinguer les composantes suivantes :

- généalogie,
- précision géométrique,
- précision sémantique,
- exhaustivité,
- cohérence logique,
- actualité.

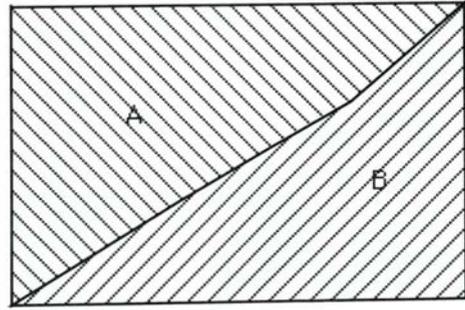
On s'attachera surtout aux précisions géométrique et sémantique, ainsi qu'à l'exhaustivité. La généalogie est intéressante pour les sources d'erreur, ce qui ne nous concerne pas directement. La cohérence logique est plutôt relative au respect des spécifications de la base de données. Quant à l'actualité, elle a un impact difficile à estimer sur l'exactitude, et on la laissera donc de côté pour l'instant.

##### A2 - Exemple de mise en évidence des erreurs

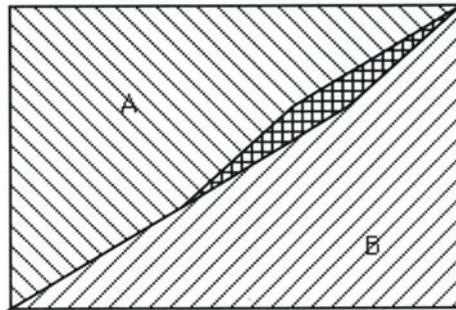
Une des opérations qui met le plus en évidence les trois types d'erreur présentés ci-dessus est la superposition de couches illustrée par les figures 5, 6, 7.



Les polygones A et B sur la couche 1

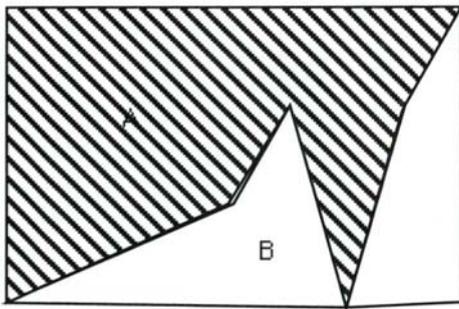


Les polygones A et B sur la couche 2

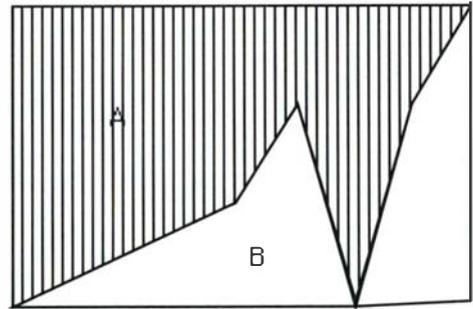


Apparition d'un polygone parasite après superposition

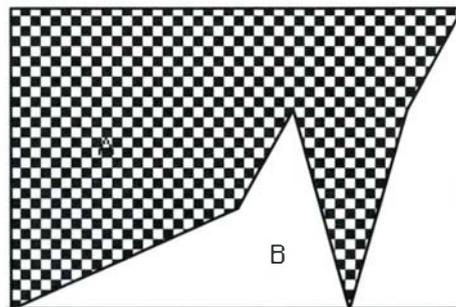
figure 5 : apparition de polygones parasites



Classification des polygones sur la couche 1

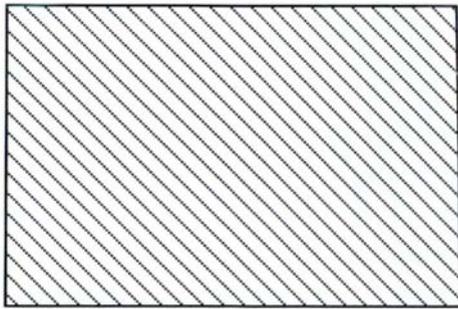


Classification des polygones sur la couche 2

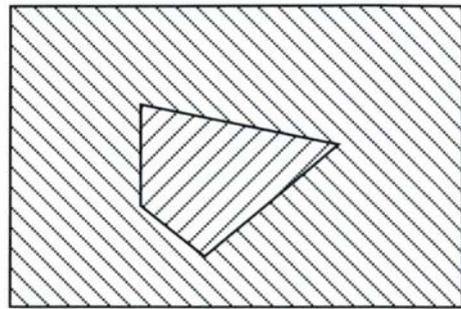


Mise en évidence des écarts par superposition

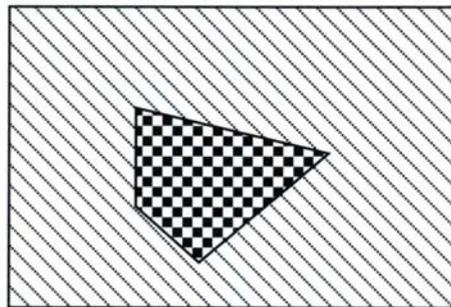
figure 6 : mise en évidence des écarts par superposition



Un polygone dans la couche 1



son équivalent dans la couche 2



Après superposition  
erreur d'exhaustivité + erreur sémantique

figure 7 : mise en évidence d'erreurs par superposition

Les erreurs suivantes sont mises en évidence :

- *erreur géométrique* : apparition de "polygones parasites" révélant des écarts positionnels entre les frontières de polygones correspondants,
- *erreur sémantique* : différence de classification entre deux polygones superposés,
- *erreur d'exhaustivité* : un polygone dans une des couches n'a pas de correspondant dans l'autre.

### A3 - Remarques

La différence entre les résolutions respectives de chaque couche initiale a un impact sur les écarts constatés au moment de la superposition de couche. Elle peut expliquer que la frontière entre deux polygones soit plus caricaturée dans une couche que dans l'autre, ou que certains objets n'apparaissent pas dans la couche la moins fine.

Le processus de superposition de couches agit donc un révélateur de l'inexactitude des jeux de données utilisés. Il est également intéressant de pouvoir l'utiliser en simulation. Pour cela, on duplique une couche et on applique à la copie une des opérations suivantes :

- perturbation géométrique (translation, rotation),
- perturbation sémantique,
- ajout ou élimination d'objets.

On superpose ensuite les deux couches. On peut ainsi étudier séparément les effets de chaque type d'erreur. On peut également constater le passage d'un type à un autre. Par exemple, une forte translation aboutira à des erreurs d'exhaustivité. Cette procédure de simulation peut être relativement simple à mettre en oeuvre et offre des perspectives intéressantes.

## B - Mesure des valeurs pour chaque type

Une fois la classification admise, il reste à renseigner ce que nous désignerons dorénavant par "données d'exactitude" pour chaque jeu de données.

### B1 - Problèmes généraux

Pour des raisons de coût des tests et de disponibilité des données de référence, la mesure passe par un échantillonnage. Quelle que soit la méthode employée, les problèmes suivants se posent alors :

- sélection d'un échantillon représentatif,
- choix et disponibilité de la référence,
- interprétation des résultats.

### B2 - Mesure séparée des composantes de l'erreur *précision géométrique*

**Ce qu'on mesure** : l'écart moyen quadratique entre les coordonnées de l'objet et du point, et leur correspondant sur le terrain.

**La méthode** : par sondage. On peut également effectuer des tests de comparaison entre plusieurs versions numérisées du même objet.

**L'expérience de l'IGN** : une étude a été menée afin de déterminer les procédures de contrôle qualité. Dans le cas de la précision géométrique, on a distingué la précision géométrique ponctuelle et la précision géométrique des formes.

La procédure a été testée pour la première en comparant la BDCarto à trois références :

- |            |  |
|------------|--|
| Points GPS | —> précis mais coûteux,                |
| 1.1.       | —> pratique mais exactitude inconnue,  |
| BDTopo     | —> pratique mais peu de disponibilité. |

La précision géométrique des formes a fait l'objet de recherches à l'ENSG par Ph. HOTTIER.

**Ce qu'on obtient** : un écart moyen quadratique qu'on peut assimiler à l'écart type si le biais est nul.

**Les résultats** : il n'est pas possible de tirer des conclusions des quelques essais effectués sur des jeux de données très restreints. Ces premiers travaux devraient permettre de définir les procédures de tests applicables de façon généralisée aux BD de l'IGN.

#### - Mesure de l'exactitude sémantique

Une littérature abondante existe sur le sujet, notamment en matière de données acquises par télédétection. On procède par sondage selon les étapes suivantes :

- *Sélection d'un échantillon représentatif*. Les auteurs préconisent en majorité un échantillonnage "stratifié" afin de garantir la présence d'un nombre minimal d'individus par classe.

- *Comparaison avec une référence* (ou avec le terrain). On détermine la proportion des individus incorrectement classés. Les résultats sont rangés sous forme de matrice de confusion, ce qui permet de distinguer pour chaque classe les erreurs de confusion et les erreurs d'omission.

- *Détermination de l'intervalle de confiance*. En fonction du niveau de confiance souhaité et de la loi de probabilité choisie (souvent la loi binômiale, ou son approximation par la loi normale), on détermine un intervalle de confiance pour les proportions calculées (lesquelles ne sont que des estimations de la proportion réelle). Pour chaque classe  $i$ , on obtient alors  $m_i$  et  $M_i$  telles que  $m_i < p_i < M_i$  pour le niveau de confiance utilisé.

On peut alors prendre comme mesure de l'exactitude sémantique soit  $p_i$ , soit  $m_i$ , valeur minimale de l'intervalle de confiance. Cette mesure représente la probabilité, pour un point donné  $P_i$ , d'appartenir réellement à la classe  $i$ . L'utilisation de  $m_i$  comme mesure de la qualité sémantique a le mérite de tenir compte de l'incertitude liée à l'échantillonnage.

Une valeur globale toutes catégories confondues peut être calculée en fonction de la matrice de confusion.

- Mesure de l'exhaustivité

On effectue un échantillonnage afin de distinguer, par rapport à la référence, "ce qui manque" et "ce qui est en trop".

- La mesure des indicateurs de qualité par superposition de couches

Cette méthode a été récemment proposée par CHRISMAN. Elle consiste à superposer deux jeux de données représentant le même terrain et à classer les erreurs rencontrées en fonction de certains indices.

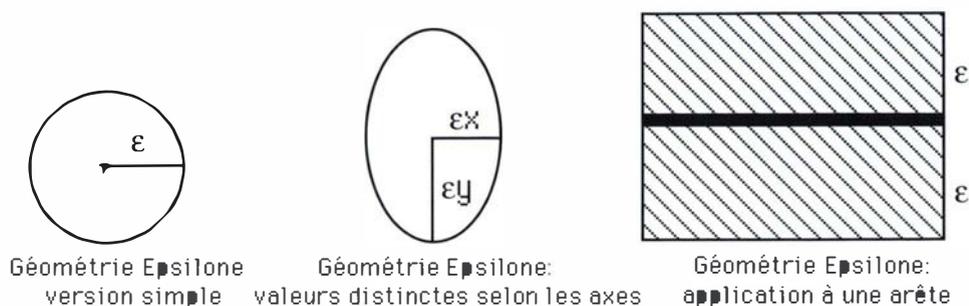


figure 8 : géométrie Epsilon

L'intérêt est que l'on ne mesure pas chaque type d'erreur indépendamment des autres. Un test séparé de l'exactitude sémantique peut en effet être faussé par des écarts d'exhaustivité entre le jeu de données et la référence. Ici, le processus de décomposition à partir d'une superposition globale pourrait permettre d'éviter ce genre de phénomène.

Cette méthode, récente et encore insuffisamment mûre d'après l'auteur lui-même, semble prometteuse.

**C - SIG et propagation de l'erreur**

**C1 - Exemple d'une application du modèle probabiliste**

Il s'agit d'une partie essentielle du sujet de recherche puisque la propagation de l'erreur mène directement à l'association d'informations "qualité" aux résultats des requêtes adressées à un SIG. Malheureusement, ce domaine vaste et varié reste en grande partie inexploré. Quelques auteurs ont traité des cas très spécifiques.

La méthode la plus simple à mettre en oeuvre est liée à un modèle probabiliste de l'erreur. Je vais présenter rapidement un exemple simple d'utilisation de la théorie des probabilités, ce qui permettra de discuter des insuffisances théoriques en la matière.

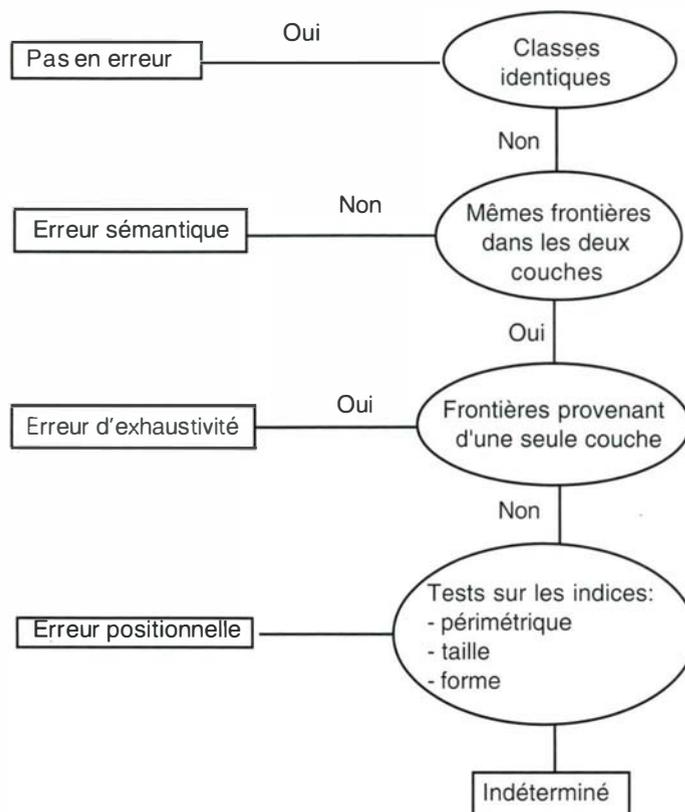


figure 9 : test de CHRISMAN

Cet exemple est destiné à montrer comment on peut offrir à l'utilisateur une visualisation du degré de fiabilité des résultats obtenus.

Soit la requête suivante : afficher les zones de forêts situées à moins de 100 m d'une route.

On suppose que l'on connaît la matrice de confusion de la couche "occupation du sol" et la précision géométrique de la couche "réseau routier".

Afin de tenir compte du degré d'incertitude de la réponse et d'en informer l'utilisateur, on peut traiter le problème de la façon suivante :

- On crée une bande de largeur  $200\text{ m} + \varepsilon$  centrée sur chaque route du réseau routier (figure 10). Cette bande est ensuite divisée en fonction d'un ensemble d'intervalles de probabilités, par exemple ( [0,33%], [33%,66%], [66%,100%] ). Les zones les plus éloignées de la route sont bien entendu les plus entachées d'incertitude. Par contre, l'ensemble des points situés à plus de 200 m et à moins de  $200\text{ m} + \varepsilon$  sont pris en compte ici alors que cela ne serait pas le cas si on ne considérait pas l'incertitude positionnelle (figure 12).

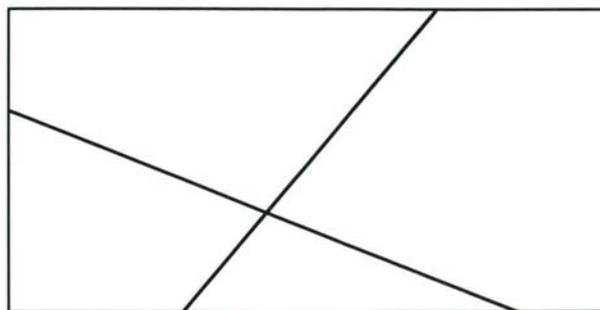


figure 10 : un réseau routier

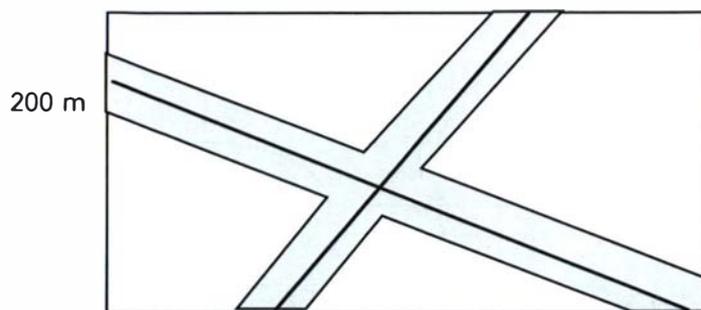


figure 11 : les zones situées à moins de 200 m d'une route

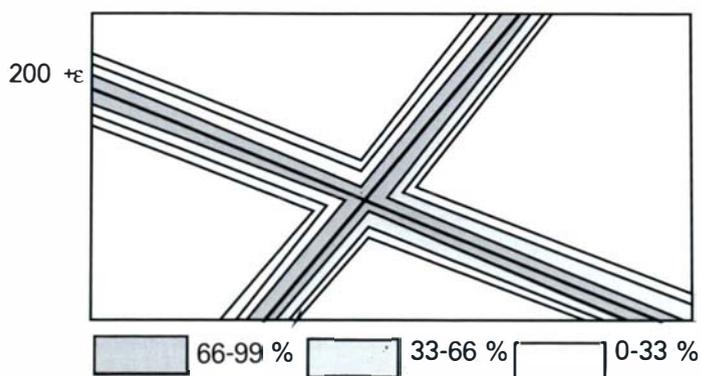


figure 12 : les mêmes zones affectées d'un coefficient d'incertitude

- Sur la couche "occupation du sol", on attribue aux parcelles de la classe "forêt" la probabilité tirée de la matrice de confusion. On attribue aux autres parcelles la probabilité qu'elles aient été confondues avec la classe "forêt", probabilité que l'on tire également de la matrice de confusion (figure 13) :

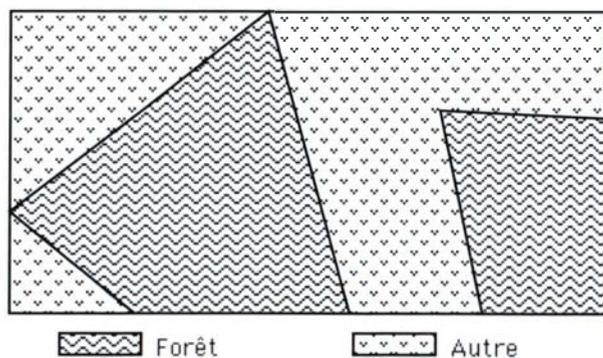


figure 13 : la couche "occupation du sol"

On réalise la superposition de couches en effectuant l'intersection des surfaces et en multipliant les probabilités correspondantes (figure 13). On obtient ainsi un ensemble de surfaces affectées de degré d'incertitudes. Il est facile alors de les répartir en "classes d'incertitudes" et de visualiser cette répartition.

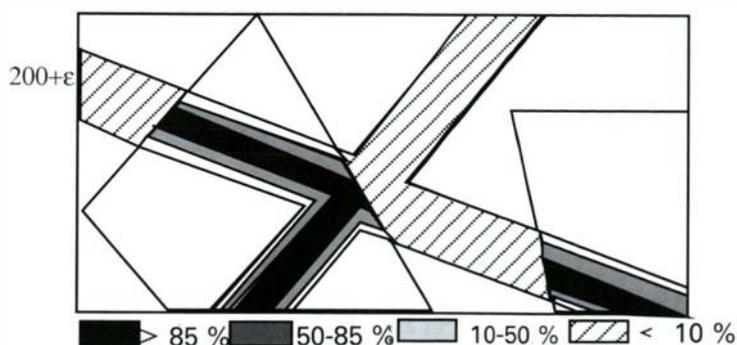


figure 14 : superposition des couches

On peut remarquer que la surface obtenue est plus importante que si on avait fait la superposition sans tenir compte des données qualité (figure 15). Par contre, une partie des surfaces va obtenir des probabilités d'exactitude négligeables.

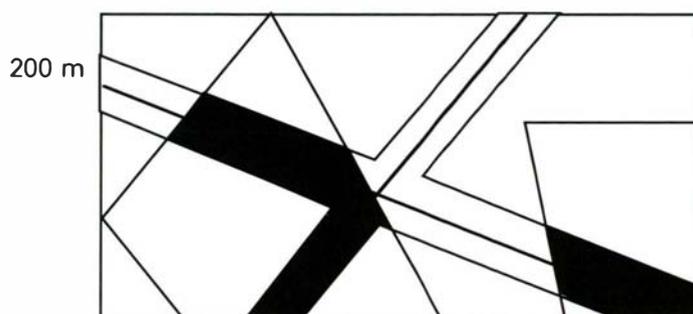


figure 15 : superposition sans tenir compte des données de qualité

Le fait de multiplier les probabilités revient à supposer l'indépendance des erreurs sur chaque couche, hypothèse qui nous mène à la partie suivante.

#### C2 - Problèmes posés par le modèle probabiliste

Un des inconvénients majeurs du modèle probabiliste vient de ce que son utilisation repose sur de nombreuses hypothèses difficilement vérifiables. Ces hypothèses portent principalement :

- sur la nature des lois de probabilité régissant les erreurs de mesure,
- sur la corrélation des différentes erreurs,
- sur l'homogénéité de la densité et de la répartition des erreurs,
- sur la représentativité des échantillons utilisés.

Il y a donc dans ce domaine un travail important à réaliser.

#### 4.1.3.3 Prolongements envisagés

Les exemples donnés ci-dessus faisaient le plus souvent appel à un processus : la superposition de couches, et à un type de données géographiques : l'occupation du sol (ou plus généralement les données surfaciques).

Bien entendu, il s'agit là d'aspects restreints d'un SIG ou d'une BD géographique. Cette restriction me semble cependant nécessaire dans un premier temps afin de pouvoir mener une étude approfondie. Je propose donc de suivre le plan suivant, en utilisant toujours la superposition de couches comme fil conducteur :

- analyser, en effectuant des simulations, l'effet des différents types d'erreurs,
- mesurer, en s'inspirant de l'utilisation des algorithmes de superposition de couches préconisée par CHRISMAN, les différents indicateurs de qualité,
- tester des modèles de propagation de l'erreur tels que celui brièvement décrit ci-dessus.

#### 4.1.3.4 Bibliographie

Le travail réalisé en 1992 a principalement consisté à établir la bibliographie donnée ci-dessous :

- [ARONOFF 1982] S. Aronoff : *Classification accuracy : A user approach*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 48, n° 8, pp. 1299-1307, 1982.
- [ARONOFF 1984] S. Aronoff : *An approach to optimized labeling of image classes*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 50, n° 6, pp. 719-727, 1984.
- [ARONOFF 1985] S. Aronoff : *The minimum accuracy value as an index of classification accuracy*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 51, n° 1, pp. 99-111, 1985.
- [BEARD 1989] K. Beard : *Use errors : the neglected error component*, AUTO-CARTO 9, pp. 808-818 - avril 1989.
- [BÉDARD 1987] Y. Bédard : *Uncertainty in land information systems databases*, AUTO-CARTO 8, pp. 175-184 - mars 1987.
- [CHASSERY 1988] JM. Chassery : *Géométrie discrète : définitions et propriétés de base*, ATP Math-Info & Appli. - novembre 1988.
- [CHRISMAN 1982] NR. Chrisman : *A theory of cartographic error and its measurement in digital data bases*, Proc. AUTO-CARTO 5, pp. 159-168, 1982.
- [CHRISMAN 1983] NR. Chrisman : *Epsilon Filtering : A technique for Automatic Scale Changing*, Proc. 43rd Annual meeting of ACSM, Washington DC (USA), pp. 322-331, 1983.
- [CHRISMAN 1983] NR. Chrisman : *The role of quality information in the long-term functioning of a GIS*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 303-321, 1983.
- [CHRISMAN 1989] NR. Chrisman : *Errors in categorical maps : testing versus simulation*, AUTO-CARTO 9, pp. 521-529 - avril 1989.
- [CHRISMAN 1990] NR. Chrisman : *Détermination de la qualité des données dans un SIG : Modèles et épreuves*, Colloque International Intégration de la Photogrammétrie dans les SIG - novembre 1990.
- [DICKS 1987] SE. Dicks & HCL Thomas : *Evaluation of thematic map accuracy in a land use and cover mapping program*, AUTO-CARTO 8, pp. 7-20 - mars 1987.
- [DON 1985] H. Don, M. Dwyer & M. Mogg : *Methods for comparing data entry systems*, AUTO-CARTO 7, pp. 237-243 - mars 1985.
- [DOUGENIK 1980] J. Dougenik : *WHIRLPOOL : A program for polygon overlay*, Proc. AUTO-CARTO 4, pp. 304-311, 1980.
- [FITZPATRICK-LINS 1978] K. Fitzpatrick-Lins : *Accuracy and consistency comparisons of land use and land cover maps made from high-altitude photographs and Landsat multispectral imagery*, Journal of Research, US geological Survey, vol. 6, n° 1, pp. 23-40, 1978.
- [FITZPATRICK-LINS 1978] K. Fitzpatrick-Lins : *Accuracy of selected land use and land cover maps in the greater Atlanta region, Georgia*, Journal of Research, US Geological Survey, vol. 6, n°. 2, pp. 169-173, 1978.
- [FITZPATRICK-LINS 1981] K. Fitzpatrick-Lins : *Comparison of sampling procedures and data analysis for a land-use and land-cover map.*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 47, n°. 3, pp. 343-351, 1981.
- [FRANCK 1987] AU. Franck : *Overlay processing in spatial information systems*, AUTO-CARTO 8, pp 16-31 - mars 1987.
- [FRANKLIN 1984] WR. Franklin : *Cartographic errors symptomatic of underlying algebra problems*, Proc. of the Int. Symp. on Spatial Data Handling, Zürich (CH), pp. 190-208 - August 1984.
- [FRANKLIN 1987] WR. Franklin & PY. Wu : *A polygon overlay system in Prolog*, AUTO-CARTO 8, pp. 97-106 - Mars 1987.
- [GENDEREN 1977] JL. Genderen & BF. Lock : *Testing Land-use map accuracy*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43, n° 9, pp. 1135-1137, 1977.
- [GENDEREN 1978] JL. Genderen, BF. Lock & PA. Vass : *Remote sensing : Statistical testing og thematic map accuracy*, Remote Sensing and Environment, vol. 7, n°. 1, pp. 3-14, 1978.
- [GINEVAN 1979] ME. Ginevan : *Testing land-use map accuracy : Another look*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 45, n° 10, pp. 1371-1377, 1979.
- [GOODCHILD 1978] MF. Goodchild : *Statistical Aspects of the Polygon Overlay Problem*, Harvard Papers on Geographical Information Systems, vol. 6, 1978.
- [GOODCHILD 1987] MF. Goodchild & O. Dubuc : *A model of error for choropleth maps, with applications to geographic information systems*, AUTO-CARTO 8, pp. 165-174 - mars 1987.
- [GOODCHILD 1989] MF. Goodchild & W. Min-Hua : *Modeling errors for remotely sensed data input to GIS*, AUTO-CARTO 9, pp. 530-537 - avril 1989.
- [GREENE 1986] DH. Greene & FF. Yao : *Finite resolution computational geometry*, 27th IEEE Annual Symp. on Foundations of Computer Science, pp. 143-152 - octobre 1986.
- [GREENLAND 1985] A. Greenland & RM. Socher : *Statistical evaluation of accuracy for digital cartographic data bases*, AUTO-CARTO 7, pp. 212-221 - mars 1985.
- [GUIBAS 1989] L. Guibas, D. Salesin & J. Stolfi : *Epsilon geometry : Buikding Robust Algorithms from Imprecise Computations*, Proc. 5th Annual ACM Symposium on Computational Geometry, 1989.
- [HENDERSON 1985] J. Henderson : *The utility of a GIS in evaluating the accuracy of classified landsat land cover type maps of the Kenai peninsula*, AUTO-CARTO 7, pp. 257-266 - mars 1985.

- [JAMET 1990] O. Jamet & A. Bianchin : *Mesuring the accuracy of the Land-Use Content of a GIS*, Proc. EURO-CARTO 8 - avril 1990.
- [JAMET 1990] O. Jamet : *Mesure de la qualité de l'information d'occupation du sol dans un S.I.G.*, Colloque International Intégration de la Photogrammétrie dans les SIG - novembre 1990.
- [KENK 1988] E. Kenk, M. Sondheim & B. Yee : *Methods for improving accuracy of thematic mapper ground cover classifications*, Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 14, n° 1, pp. 17-31, 1988.
- [MILENKOVEC 1989] V. Milenkovec : *Verifiable Implementations of Geometric Algorithms Using Finite Precision Arithmetic*, Geometrical Reasoning, MIT Press, Cambridge, MA (USA), 1989.
- [ROBINSON 1985] VB. Robinson : *About different kinds of uncertainty in collections of spatial data*, AUTO-CARTO 7, pp. 440-449 - mars 1985.
- [ROSENFELD 1980] G. Rosenfield & M. Melley : *Applications of statistics to thematic mapping*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 46, pp. 1287-1294, 1980.
- [ROSENFELD 1982] GH. Rosenfield, K. Fitzpatrick-Lins & HS. Ling : *Sampling for thematic map accuracy testing*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 48, n° 1, pp. 131-137, 1982.
- [ROSENFELD 1986] GH. Rosenfield & K. Fitzpatrick-Lins : *A Coefficient of Agreement as a mesure of Thematic Classification Accuracy*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, pp. 223-227 - février 1986.
- [SAALFELD 1987] A. Saalfeld : *Stability of Map Topology and Robustness of Map Geometry*, Proc. AUTO-CARTO 8, Baltimore (USA), 1987.
- [SAALFELD 1989] A. Saalfeld : *The combinatorial complexity of polygon overlay*, AUTO-CARTO 9, pp. 278-287 - avril 1989.
- [SELDEN 1985] D. Selden : *An approach to evaluation and benchmark testing of cartographic data production system*, AUTO-CARTO 7, pp. 499-509 - mars 1985.
- [THOMAS 1984] LL. Thomas & G. Mck Allcock : *Determining the confidence level for a classification*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 50, n° 10, pp. 1491-1496, 1984.
- [VONDEROHE 1985] AP. Vonderohe & NR. Chrisman : *Tests to establish the quality of digital cartographic data : some exemples from the Dane County Land Records project*, AUTO CARTO 7, pp. 522-599 - mars 1985.
- [WHITE 1978] D. White : *A Design for Polygon Overlay*, Harvard Papers on Geographical Information Systems, 1978.
- [WHITE 1989] D. White, M. Maizel, K. Chan & J. Corson-Rikert : *Polygon overlay to support point sample mapping : the national resource inventory*, AUTO-CARTO 9, pp. 384-391 - mars 1985.
- [ZHANG 1990] G. Zhang & J. Tulip : *An Algorithm for the Avoidance of Sliver Polygons and Cluster of Points in Spatial Overlay*, 4th International Symposium on Spatial Data Handling, Zurich (CH), pp. 141-150, 1990.

#### 4.1.4 Gestion de BD de grande extension

par Serge MOTET

##### 4.1.4.1 Contexte - Objectifs

Seulement deux problèmes spécifiques aux BD géographiques de grande extension ont été abordés : l'historique (cf. gestion du temps) et la vue continue d'une BD qui, en raison de sa taille, est conservée sur plusieurs supports ou plusieurs sites. Chaque support contient l'information complète sur une zone (un département ou une feuille 1 : 50 000). On veut que ce découpage n'apparaisse pas dans l'utilisation.

Peu de résultats nouveaux pouvant être espérés sur les techniques de stockage, on s'est attaché à définir le langage de requête et les mécanismes qui masquent le découpage en transformant une requête en autant de requêtes qu'il y a de sites concernés.

##### 4.1.4.2 Activité / Résultats

On a défini un langage et un traducteur. Ce langage décrit la géométrie grâce à des points (variables à valeur dans  $\mathbb{R}^2$ ) qui ne sont pas attachés à un détail particulier et donc indépendants du support de stockage du détail. Par exemple, les routes d'une commune X se demandent par : "trouver les points qui sont dans la commune X et sur une route ?"

Dans une question, on cherche :

- les clés alpha-numériques,
- les critères non localisant (dispersé, bien réparti) : "une route",
- les critères localisants : "la commune X" ..

Les critères localisants (et éventuellement les clés) déterminent les sites à interroger.

La question est reformulée en fonction du site et avec des domaines classiques des SIG : "trouver les arcs appartenant à un objet route et dont les faces à gauche ou à droite appartiennent à la commune X ?"

Une maquette a été réalisée en Prolog.

#### 4.1.4.3 Prolongements envisagés

Il resterait à étudier les problèmes de partage de points et de lignes en limite de feuille (regrouper des réponses en une seule).

#### 4.1.4.4 Références

[BENMOHAMED 93] M. Benmohamed : *Etude des bases de données localisées de grande extension*, Thèse de doctorat de l'université Paris 7, soutenance prévue en mars 1993.

[MOTET 90] S. Motet : *An Interface Using the Relational Plan Domain*, 4th ISSDH, Zurich (CH), pp. 450-454, 1990.

### 4.1.5 Gestion du temps dans les SIG

*par Serge MOTET*

#### 4.1.5.1 Contexte - Objectifs

Un SIG doté d'un historique peut conserver et analyser les états anciens et l'évolution des informations. L'historique sert aux études d'extrapolation, de prévision ou de prospective.

#### 4.1.5.2 Activité / Résultats

On a étudié deux méthodes de conservation de l'historique : les versions (succession d'états) et le journal (enregistrement des modifications), en s'attachant plus particulièrement au journal.

La difficulté est de définir un modèle de données pour conserver les modifications.

Pour le niveau descriptif, les opérations sont bien connues : création, effacement, modification d'attributs. Une implémentation en orienté-objet sur le SGBD 02 de ce niveau a été réalisée.

Pour le niveau topologique, les transformations sont interdépendantes : la suppression d'un arc fusionne deux faces. Une première liste des opérations atomiques pour la topologie a été proposée. Cette liste est complète (toute modification est un ensemble d'opérations) et chaque opération maintient la cohérence.

On a proposé un schéma entité-association pour ce niveau.

#### 4.1.5.3 Prolongements envisagés

En 1993, on souhaite confirmer les études sur le journal en réalisant une maquette sur des classifications à des dates différentes.

Ensuite, on pourrait réaliser le journal sur le SGBD 02 ou faire une autre maquette sur une BD IGN.

Enfin, on réalisera une ou deux applications démonstratives de l'intérêt de l'historique.

#### 4.1.5.4 Références

[MOTET 92] S. Motet : *Les besoins pour la gestion de l'historique dans les SIG*, Actes de SIG/GIS - septembre 1992.

## 4.2 GÉNÉRALISATION CARTOGRAPHIQUE

### 4.2.1 Généralisation cartographique : approche IA

*par Jean-Philippe LAGRANGE*

Le but des recherches en généralisation (recherches décrites dans la partie 4.2) est de mettre au point des techniques pour l'automatisation de la rédaction des cartes à partir des bases de données BDTopo et BDCarto. A moyen terme on se restreint à :

- l'assistance à la rédaction : il s'agit de pouvoir proposer un environnement, une interface mais non réduite à une boîte à algorithmes, qui automatise une partie des tâches et autorise une généralisation supervisée par un opérateur,
- la production de cartes au 1 : 25 000 (puis 1 : 50 000) à partir de la BDTopo et au 1 : 100 000 à partir de la BDCarto. Les échelles plus petites font néanmoins l'objet de recherches.

#### 4.2.1.1 Contexte

L'utilisation des bases de données en cours de constitution pour produire des représentations cartographiques est à l'heure actuelle largement "manuelle" et coûteuse.

La production des cartes à partir des bases de données implique deux étapes principales :

- d'une part, un changement de niveau d'abstraction pour les données initiales, qui correspond à une généralisation du schéma de la base de données en fonction du produit attendu. A l'issue de cette étape on a un lot de données "géographiques" qui a été extrait (et transformé : agrégations...) à partir de la base de données. Les opérations de changement de schéma et le problème de la modélisation relèvent des recherches décrites en 4.1.1 et en 4.1.2. Le modèle de données retenu est repris en substance pour les recherches en généralisation,
- d'autre part, la construction d'une représentation cartographique et la généralisation des données ainsi constituées. Cette étape inclut par exemple des opérations de symbolisation et d'agrégation en fonction du type de carte et de l'échelle de la carte.

De façon résumée, la généralisation va consister à :

- simplifier les objets (lissages...),
- caricaturer des objets,
- détecter des structures d'objets et agréger ces objets (structures de bâti, structures de rocade dans l'urbain, alignements d'objets...) de façon à les généraliser en conservant la structure initiale,
- généraliser des carrefours (ce qui relève de la caricature, mais il s'agit d'un cas spécifique important et délicat),
- détecter les conflits, dûs à la symbolisation et aux déplacements,
- déplacer ou déformer des objets pour résoudre les conflits.

Différentes études ont déjà été menées à l'IGN en vue de l'automatisation de ces opérations :

- stage de C. DESTANDEAU (positionnement de toponymes) 1984,
- stage de C. MEYNARD (modélisation de la BDCarto pour la généralisation) 1989,
- thèse de P. TITEUX (automatisation des problèmes de positionnement sous contraintes) 1989,
- stage de DEA de M. PERNOT (automatisation de la généralisation) 1989,
- thèse de Mme ZHAO (généralisation des carrefours, en liaison avec le COGIT) 1990,
- stage de DEA F. CHIRIÉ (placement des noms de villes, au COGIT) 1992,
- stage de DEA N. LAMBERT, à l'IfK Hanovre (généralisation de l'hydro) 1992,
- études du BEC sur la production du 1 : 25 000 et du 1 : 100 000.

Il y a eu aussi un grand nombre de recherches à l'étranger, essentiellement aux États-Unis et en Europe. Ces recherches ont le plus souvent été le fait d'universitaires et/ou ont été de nature plutôt

ponctuelle<sup>1</sup> (automatisation de telle ou telle opération, problématique de tel ou tel aspect de la généralisation...). Un état de l'art du domaine est disponible au COGIT.

On peut néanmoins déceler une tendance vers la recherche de solutions plus complètes :

- les organismes producteurs de données géographiques commencent à accorder de plus en plus d'importance à ce problème et des groupes de travail internationaux se constituent,
- les producteurs de SIG s'y intéressent également : ZEISS a repris dans son logiciel Phocus les algorithmes développés à l'université de Hanovre (Change) et Intergraph propose depuis peu une boîte à outils de généralisation (MGE Generalizer).

Il n'y a pas en revanche à l'heure actuelle de solution complète répondant aux besoins de l'IGN : les outils disponibles sont soit limités (généralisation séparée des thèmes routier et bâti jusqu'au 1 : 25 000 pour Phocus/Change) soit peu facilement utilisables par un opérateur car se limitant à une boîte à outil (MGE, pour autant que nous puissions en juger, d'autant qu'il n'y a pas prise en compte de la topologie).

#### **4.2.1.2 Objectifs**

Dans un premier temps, il a été choisi de se limiter à prendre en compte une partie des données : couches routière, hydro et objets "ponctuels" (bâtiments remarquables ou isolés, points remarquables représentés par un symbole). De plus on s'est restreint, toujours dans un premier temps, aux opérateurs de base à l'exclusion de ceux qui nécessitent des identifications complexes.

La recherche décrite ici doit aborder les problèmes relatifs à la généralisation des objets complexes : structures et carrefours, et relatifs aux tâches "de haut niveau" : détection / résolution des conflits et supervision assistée des opérations. En ce qui concerne les problèmes de structures et de carrefours, le premier a été proposé comme sujet d'une thèse, pour lequel il n'y a eu aucun candidat, et sera reproposé par le COGIT l'an prochain. Le second sera étudié ultérieurement. En fait il paraît raisonnable de d'abord traiter le problème des structures routières de façon couplée avec les recherches sur la généralisation des carrefours. Les autres structures, notamment structures de bâti, seront étudiées plus tard. Les mécanismes de supervision (choix des zones à traiter en premier, élaboration d'un plan de généralisation et de sous-plans pour chaque problème... c'est-à-dire à une automatisation plus poussée de la généralisation) ne peuvent quant à eux être étudiés qu'une fois les opérations et traitements élémentaires implémentés.

Les recherches sont donc centrées pour l'instant sur les opérations de détection et de résolution des conflits.

Nous n'avons pas pour l'instant inclus la construction de la représentation cartographique initiale à partir des données "géographiques" (construction de la légende) dans les recherches en généralisation. Cette construction sera abordée lorsque nous aurons assez d'éléments pour l'automatisation de la généralisation cartographique (interactive). Nous travaillons pour l'instant avec des objets dont la représentation est choisie interactivement.

#### **4.2.1.3 Démarche et problèmes rencontrés**

Compte tenu du fait que le problème abordé en premier (détection et résolution des conflits) ainsi que ceux prévus pour les phases ultérieures se prêtent bien à une approche "à base de connaissances", il a été choisi d'utiliser un générateur de systèmes experts comme environnement de développement. Comme nous disposons de l'environnement KEE de Intellicorp, nous nous sommes d'abord orientés vers cette solution. L'objectif est de mettre au point des techniques qui devront probablement être ensuite retranscrites dans une autre forme de programmation. Les fonctions (de bas niveau) pour les détections de conflits peuvent alors être codées sous forme de procédures (méthodes) et les choix à faire pour l'enchaînement des traitements, en particulier pour la résolution des conflits, peuvent être exprimés par des règles "expertes".

En ce qui concerne les données sur lesquelles nous travaillons, il a été choisi de créer d'abord des éléments fictifs interactivement et de développer sur ces données un noyau minimal du système. Dans un deuxième temps, il sera alors possible de charger des jeux test. A priori il n'est pas envisagé pour l'instant de porter sur l'environnement expert l'ensemble des algorithmes de simplification et de caricature développés dans le cadre de l'autre recherche sur la généralisation (voir partie 4.2.2), un certain nombre de simplifications et de caricatures devront donc être effectuées interactivement (en s'appuyant sur les

---

<sup>1</sup> Cela d'ailleurs été le cas aussi à l'IGN dans le passé.

fonctions de modification interactives et un ou deux algorithmes implémentés) avant de lancer des recherches de conflits. En ce qui concerne le chargement des données, nous comptons nous appuyer sur le nouvel environnement choisi et sur les travaux de l'équipe BD (utilisation du module de connexion LeLisp-O2 O2 Link).

Lorsque l'action de recherche a commencé (début de l'année universitaire 1991-1992), nous disposions de la version 3.1 de KEE, au sujet de laquelle nous avons déjà constaté dans le passé qu'elle prenait difficilement en compte de gros lots de données. Les recherches ont néanmoins été commencées avec cet outil que nous connaissions bien. Cependant nous avons été progressivement amenés à décider de changer de plate-forme, d'autant que des problèmes de distribution sont apparus (plus de distributeur en France).

Les problèmes de performance nous ont conduits à privilégier l'aspect structuration des objets et des méthodes dans les développements sur KEE.

Nous avons donc choisi de nous diriger vers un autre environnement de développement, plus précisément les produits offerts par ILOG (SMECI+Aïda+Maïda 2-D). Ceci impose de développer une nouvelle interface mais par contre la partie Langage Orienté Objet (LOO) sera sans doute relativement facile à transcrire (ce changement a par ailleurs nécessité de consacrer un mois pour la formation à l'outil).

#### 4.2.1.4 Etat d'avancement

Les développements ont porté jusqu'à maintenant sur la définition des objets (structuration des données + méthodes associées) et sur l'interface de visualisation-manipulation. Cette dernière a été écrite par programmation objet en sur-couche de l'interface de KEE, ce qui a facilité le travail. Elle est en cours de portage sur l'environnement Maïda 2-D, parallèlement à la prise en main du logiciel, la mise en route de coopérations externes ayant absorbé une partie significative de nos moyens (2 ingénieurs) durant l'automne.

La description qui suit correspond à ce qui a été implémenté sur KEE, c'est-à-dire à ce qui est en cours de portage.

Compte tenu des contraintes de représentation du formalisme objet, les liens sémantiques entre objets (association du modèle conceptuel) sont gérés dans des attributs. La cohérence (inversibilité du lien) est obtenue en :

- gérant à chaque fois deux attributs réciproques (par exemple un objet complexe *O1* qui a pour composant un objet simple *O2*, a dans son attribut sous-objets la valeur - un pointeur sur - *O2* et réciproquement *O2* a dans son attribut sur-objet la valeur *O1*),
- utilisant des méthodes de création et de destruction (et non les fonctions standards du logiciel) qui maintiennent la validité des valeurs d'attributs.

Par rapport à un schéma conceptuel, on a donc uniquement des hiérarchies de classes d'objets; les liens, ou associations, sont "masqués" dans des attributs<sup>1</sup>. Les liens utilisés pour l'instant sont de deux types : liens entre objets d'une même couche (liens de composition, liens sommet-arc) et liens de "représentation" entre objets de deux couches différentes.

### A - Structuration des objets

Les objets sont structurés en trois couches de façon classique :

- objets-géographiques (issus de la BD après généralisation du schéma de données),
- objets-représentation ou objets cartographiques, qui portent la topologie,
- objets graphiques (utilisés pour l'interface et qui portent la géométrie sur laquelle on opère).

Les *objets géographiques* sont divisés en objets simples et objets complexes, reprenant en cela la classification adoptée dans les BD IGN. Les principales classes d'objets géographiques classiques sont décrites dans la hiérarchie. Chaque classe d'objets géographiques connaît les classes d'objets représentation que l'on peut lui associer. Par exemple les arcs (lignes + cubiques) et les polygones pour les routes.

Les *objets-représentation* sont divisés eux aussi en deux sous-classes : objets composés et objets simples<sup>2</sup>. Les classes d'objets simples comprennent les objets simples linéaires (arcs, polygones et surfaces) et les objets simples ponctuels (symboles et nœuds topologiques). La classe des objets

<sup>1</sup> En cas de besoin, lien de proximité par exemple, on utilise des attributs complexes.

<sup>2</sup> Cette classification est appelée à être modifiée par SMECI.

composés permet quant à elle de modéliser les agrégations d'objets. Ceci est réalisé de façon analogue à la composition d'objets géographiques. Les objets représentation portent des attributs de symbolisation tels que couleur, largeur du trait, type de tracé (simple, double, avec ou sans axe, pour les objets linéaires par exemple).

Les *objets-graphiques* servent à la visualisation sur écran et sont divisés en bitmaps (pour les symboles et nœuds topologiques), lignes et arcs de cubiques (plus polygones et polygones sur Maïda2-D). Ces classes sont intégrées dans la couche graphique du logiciel ce qui permet de tirer parti des fonctionnalités de ce dernier : zoom, accès souris... sont gérés de façon assez simple.

## **B - Fonctionnalités développées**

### **B1 - Méthodes associées aux objets**

Les objets-géographiques ont pour l'instant seulement des méthodes de création, de destruction et d'affichage (au sens affichage de la description de l'objet).

Les objets-représentation ont un comportement plus développé, surtout pour les objets linéaires :

- on retrouve bien sûr les méthodes de création et de destruction,
- des méthodes de déplacement permettent de déplacer un objet, interactivement (en guidant à la souris) ou programmatiquement (en donnant le déplacement) et en entraînant les objets liés ou non. Un cas particulier de déplacement est le déplacement atténué ou amorti (de façon continue suivant la distance au "point d'impact", d'abord en  $1/x$  puis en  $1/x^2$ ) qui permet de déplacer localement un objet en déformant le reste du réseau dans le voisinage,
- des méthodes de calcul de distance qui s'appuient sur les méthodes correspondantes des objets-graphiques sous-jacents.

Les objets-graphiques ont des méthodes :

- de création et de destruction adaptées,
- de déplacement, de dessin, de détection de pointé à la souris et de réaction à un événement souris conformes au fonctionnement des objets graphiques du logiciel,
- des méthodes de calcul des positions en coordonnées "absolues",
- des méthodes de calcul d'intersections et de distances (ponctuel-linéaire, segment-segment, cubique-segment et cubique-cubique).

### **B2 - Fonctions de l'interface**

L'interface s'appuie sur les mécanismes de KEE et sur du code spécifique. Les accès souris sont détectés au niveau des objets-graphiques. Un pointé sur un tel objet provoque l'envoi d'un message à cet objet qui en retour va, suivant les cas, s'envoyer un message à lui-même ou envoyer un message à l'objet représentation associé ou à l'objet géographique.

En résumé, on peut créer ou détruire des objets, changer certains aspects de leur symbolisation, les déplacer, les déformer, demander des évaluations d'intersection ou de distance et demander un affichage ou une description. Les transformations sont visualisées "en continu", à la vitesse de calcul près.

L'ensemble du code développé représente environ 3 000 lignes de LISP dans des fichiers séparés, plus 5 000 lignes dans le fichier des méthodes (lequel est géré par KEE ce qui fait qu'il est difficile d'évaluer précisément le nombre de lignes de fonctions que l'on aurait par une écriture classique).

## **4.2.1.5 Prolongements envisagés**

Les développements effectués ont été concentrés sur la description de la structure et de la dynamique "de base" des objets ainsi que, par la force des choses, sur la partie interface qui permet de visualiser les opérations et de travailler plus confortablement.

A partir de ce qui a été fait, et une fois terminé le portage sur Maïda2-D-SMECI, les développements qui vont suivre seront :

- connexion au quadtree (index spatial) géré par Maïda2-D pour en tirer parti,

- mise en place de la détermination des voisins et des objets en conflit (à partir des méthodes de calcul de distance et de l'indexation spatiale),
- puis écriture de règles permettant de gérer les conflits : choix des priorités de traitement et détermination de la résolution.

Avec ces extensions, il sera possible de mettre au point progressivement des stratégies et des mécanismes de traitement des conflits. Il faudra alors développer un peu plus la gestion de la topologie pour pouvoir détecter les cas de franchissement. De façon connexe cela permettra de détecter les configurations en sifflet.

#### 4.2.1.6 Collaborations extérieures

L'équipe généralisation participe au projet Eureka EU-706 GENEGIS depuis le mois d'avril 1992. En pratique, cette participation s'est limitée à des contacts relatifs à la mise en route du projet jusqu'à l'été. En revanche elle a absorbé une charge de travail non négligeable depuis, d'une part pour fournir des rapports à six mois au ministère de l'industrie (incluant une étude de l'état de l'art qui était par ailleurs utile pour les recherches internes) et, d'autre part, pour établir des contacts avec de nouveaux partenaires potentiels (l'Ordnance Survey et l'Institut für Kartographie de l'Université de Hanovre) et établir un programme de travail dans ce cadre avec l'Ordnance Survey.

Par ailleurs l'équipe est aussi partie prenante à un groupe de travail international sur la généralisation, constitué en 1991 au sein de l'ACI. Ce groupe a surtout été un cadre de contacts et de dialogue cette année. A. RUAS a, à ce titre, participé à une réunion lors de l'ISPRS en août 1992 et présenté l'activité de l'IGN dans le domaine.

Enfin un groupe européen a été lancé au sein de l'OEEPE, avec pour but de mettre en place une coopération concrète. L'organisation de la constitution de ce groupe a été prise en charge par l'IGN, plus précisément par A. JAEGLER (DG) et JPh. LAGRANGE (COGIT).

#### 4.2.1.7 Références

- [LAGRANGE 92] JPh. Lagrange : *Etat d'avancement de l'action de recherche au 19 Juin 1992*, Rapport intermédiaire, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - juin 1992.
- [RUAS 92] A. Ruas : *Etat de l'art en généralisation*, Rapport au Ministère de l'Industrie, laboratoire COGIT, Service de la Recherche, IGN - novembre 1992.
- [RUAS 92] A. Ruas & JPh. Lagrange : *IGN's research on generalization*, Communication à la réunion du groupe de travail de l'ACI sur la généralisation, lors du congrès 1992 de l'ISPRS.

#### 4.2.1.8 Bibliographie

Un travail important d'Etat de l'Art a été réalisé en 1992 et a consisté, en particulier, à établir la bibliographie donnée ci-dessous. Cette bibliographie est commune aux deux actions de recherches de généralisation.

- [AHN] J. Ahn, H. Freeman : *A program for automatic name placement*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 444-453, 1983.
- [AMGHAR, HALIMA] Y. Amghar & O. Halima : *L'objet actif, base d'une nouvelle génération de systèmes d'information*, AFCET/Interfaces, n° 108, pp. 7-11, 1991.
- [ARGIALAS et al] DP. Argialas, J. Lyon & O. Mintzer : *Quantitative description and classification of drainage patterns*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 4, n° 54, pp. 505-509, 1986.
- [ARMSTRONG, BENNETT] M. Armstrong & D. Bennett : *A knowledge based object-oriented approach to cartographic generalization*, Proc. GIS/LIS, pp. 48-57, 1990.
- [ARMSTRONG] M. Armstrong : *Knowledge classification and organization*, Map generalization, 1991.
- [AUMANN, EBNER] G. Aumann & H. Ebner : *Generation of high fidelity digital terrain models from contours*, Proc. ISPRS, vol. 4, pp. 980-985, 1992.
- [BADLER, FININ] N. Badler & T. Finin : *Computers graphics and expert systems*, IEE CG & A, 28, pp. 25, 1985.
- [BATTY] M. Batty : *Multiple representation*, Proc. NCGIA, 1989.
- [BEARD, MACKANES] K. Béard & W. Mackanes : *Generalization operations and supporting structures*, Proc. AUTO-CARTO 10, pp. 29-45, 1991.
- [BEARD] K. Beard : *Constraints on rule formation*, Map generalization, 1991.

- [BEARD] K. Beard *Theory of the cartographic line revisited*, Cartographica, vol. 28, n° 4, pp. 32-58, 1991.
- [BEARD] K. Beard : *User interaction in map generalization*, Proc. ICA, vol. 15, 1991.
- [BERG] R. Berg : *Research initiatives needed by defense mapping agency (DMA)*, Proc. NCGIA, 1989.
- [BIE] S. Bie : *Organizational needs or technological advancement - The parenthood of the "autocartographer" revisited*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 39, 1983.
- [BORGERDING et al] FE. Lortz , J. Powell, IL. Borgeding & FE Lortz : *Computer-assisted map compilation, editing, and finishing*, Proc. Auto-Carto 5, pp 141-146, 1982.
- [BOURSIER] P. Boursier : *Application Planification urbaine*, Rapport technique GIP Altaïr, 1987.
- [BRUEGGER et al] B. Bruegger R. Barrera, K. Béard & M. Ehlers : *Research topics on multiple representations*, in Proc. NCGIA, 1989.
- [BUTTENFIELD, GANTER] B. Buttenfield & J. Ganter : *Visualization and GIS : What should we see? What might we miss?*, Proc. Spatial data handling, pp. 307-316, 1990.
- [BUTTENFIELD, MARK] B. Buttenfield & M. Mark : *Expert systems in cartographic design*, 1990.
- [BUTTENFIELD] B. Buttenfield : *A rule for describing line feature geometry*, Map generalization, 1991.
- [BUTTENFIELD] B. Buttenfield : *Scale-dependence and self-similarity in cartographic lines*, Cartographica, vol. 26, pp. 79-100, 1989.
- [BUTTENFIELD] B. Buttenfield : *Thoughts on the nature of things that change with scale*, Proc. NCGIA, 1989.
- [CARON] R. Caron : *La cartographie comme rhétorique ou éléments pour un éloge du cartographe*, Bulletin d'information de l'IGN n° 1, pp. 3-14, 1980.
- [CHEN] Z. Chen : *A spatial low-pass filter working for triangular irregular network (TIN) and restricted by break lines*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 138-143, 1989.
- [CHESTERFIELD] P. Chesterfield : *Current developments in derived digital mapping at Ordnance Survey*, Proc. ICA, vol. 15, 1991.
- [CHIRIE] F. Chirié : *Programme de positionnement automatique des noms de communes*, Rapport de DEA SIG de l'ENSG, 1992.
- [CLAIRE, GUPTILL] R. Claire & S. Guptill : *Spatial operators for selected data structures*, Proc. of AUTO-CARTO 5, 1982.
- [CROMLEY] R. Cromley : *Calculating bisector skeletons using a thiesen data structure*, Proc. AUTO-CARTO 8, pp. 719-724, 1987.
- [DAMIER, DEFUDE] C. Damier & B. Defude : *Le prototype OMEGA : un SGBD extensible pour les applications géographiques*, Revue des sciences de l'information géographique et de l'Analyse Spatiale, vol. 1, n° 1, pp. 23-62, 1991.
- [DAMIER, DEFUDE] C. Damier & B. Defude : *Un modèle de données pour les informations géographiques*, Actes des quatrième Journées Bases de Données Avancées (BD3), Bénodet (F) - mai 1988.
- [DE COLA] L. De Cola : *Multiscale data models for spatial analysis with applications to multifractal phenomena*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 313-323, 1989.
- [DESTIVAL] I. Destival : *Synthèse de réunions de travail sur la généralisation en collaboration COGIT - Pr JC. Müller*, Rapport interne IGN, 1991.
- [DEVEAU] T. Deveau : *Reducing the number of points in a plane curve representation*, Proc. AUTO-CARTO 7, pp. 152-160, 1986.
- [DOBSON] J. Dobson : *Automated geography*, The professional geographer, vol. 35, n° 2, pp. 135-143, 1983.
- [DOERSCHLER, FREEMAN] J. Doerschler & H. Freeman : *An expert system for dense-map name placement*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 215-224, 1989.
- [DOUGLAS, PEUCKER] D. Douglas & T. Peucker : *Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature*, The Canadian Cartographer, vol. 10, n° 2, pp. 12-122, 1973.
- [DUTTON] GH. Dutton : *The fallacy of coordinates*, Proc. NCGIA, 1989.
- [EBINGER, GOULETTE] L. Ebinger & A. Goulette : *Automated names placement in a non-interactive environment*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 205-214, 1989.
- [FAUCONNIER] M. Fauconnier : *Impact de la programmation orienté objet sur les SIG*.
- [FOTHERINGHAM] S. Fotheringham : *Multiple representation*, Proc. NCGIA, 1989.
- [FRANKLIN, HOLMES] D. Franklin & GL. Holmes : *Overview of automated cartography efforts at DMAAC*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 438-447, 1983.
- [FRANKLIN] R. Kranklin : *Adaptive grids for geometric operations*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 230-239, 1983.
- [FRANKLIN] R. Kranklin : *Uniform grids : A technique for intersection detection on serial and parallel machines*, Proc. Auto-Carto 9, pp. 100-109, 1989.
- [GOLD] CM. Gold : *Space revised. Back to the basics*, Proc. Spatial handling, pp. 175-189, 1990.
- [GOLD] CM. Gold : *Spatial adjacency. A general approach*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 298-312, 1989.
- [GUIDETRONIC] *Le guide intelligent. Le standard de la navigation automobile*, FI3G, pp. 351-356, 1982.
- [GUNTHER] O. Gunther : *Database support for multiple representations*, Proc. NCGIA, 1989.
- [HARGREAVES, HENNING] D. Hargreaves & M. Henning : *Techniques of computer-assisted generalization accomodating subjective cogniyion and objective logic*, Cartographica, vol. 20, n° 4, pp. 55-64, 1983.
- [HERBERT et JOAO] G. Herbert & EM. Joao : *Automating map design and generalisation : A review of systems and prospects for future progress in the 1990*, 1991.
- [HERBERT et al] G. Herbert, EM. Joao & D. Rhind : *Use of an artificial intelligence approach to increase user control of automatic line generalisation*, Proc. EGIS, pp. 554-563, 1992.

- [HERRING] JR. Herring : *TIGRIS, Topologically integrated geographic information system*, Proc. AUTO-CARTO 8, pp. 282-291, 1987.
- [HIRSCH] S. Hirsch : *An algorithm for automatic name placement around point data*, The American Cartographer, vol. 9, n° 1, pp. 5-17, 1982.
- [HOHLE] J. Hohle : *The object-oriented height model and its application*, Proc. ISPRS, vol. 4, pp. 868-873, 1992.
- [HOLMES] GL. Holmes : *Computer assisted chart symbolisation at the defense mapping agency aerospace center*, Proc. AUTO-CARTO 5, pp. 387-396, 1992.
- [HSU, BEARD] PS Hsu & K. Beard : *Deriving semantic knowledge of graphic objects through scale of measurement and symbol representation*, Proc. GIS/LIS, vol. 2, pp. 789-797, 1990.
- [JACKSON] M. Jackson : *Data organization and data structures for GIS*, Proc. ICA, vol. 8, pp. 71-98, 1987.
- [JAGER] E. Jager : *Investigations on automated feature displacement for small scale maps in raster format*, Proc. ICA, vol. 15, pp. 245-256, 1991.
- [JENKS] G. Jenks : *Geographic logic in line generalization*, Cartographica, vol. 26, pp. 27-42, 1989.
- [JENKS] G. Jenks : *Thoughts on line generalization*, Proc. AUTO-CARTO 4, pp. 209-221, 1979.
- [JAOO et al] EM. Joao, G. Herbert, S. Openshaw & D. Rhind : *Magnitude and significance of generalisation and its effects*, Proc. EGIS, pp. 711-721, 1992.
- [JOHNSON, BASOGLU] D. Johnson & U. Basoglu : *The use of artificial intelligence in the automated placement of cartographic names*, Proc. AUTO-CARTO 9, 1989.
- [JONES et COOK] C. Jones & A. Cook : *Rule-based cartographic name placement with prolog*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 231-240, 1989.
- [JUNG] F. Jung : *Enjeu et perspectives de l'infographie et des informations géographiques à petite et moyenne échelle à EDF*.
- [KELLER, HUNT] J. Keller & D. Hunt : *Incorporating fuzzy membership functions into the perceptron algorithm*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp. 693-699, 1985.
- [KILPELAINEN] Kilpelainen : *Multiple representations and knowledge-based generalization of topographical data*, Proc. ISPRS, vol. 3, 1992.
- [LAMBERT] N. Lambert : *Généralisation automatique en cartographie*, Rapport DEA SIG de l'ENSG, 1992.
- [LANGRAN, PEUCKER] G. Langran & T. Peucker : *Integration of name selection and name placement*, Proc. Spatial data handling, vol. 2, pp. 50-64, 1986.
- [LANGRAN] G. Langran : *Generalization and parallel computation*, Map generalization, 1991.
- [LANGRAN] G. Langran : *Generalization in nautical charting*, Proc. ICA, 1991.
- [LAURINI, MILLERET] R. Laurini & F. Milleret : *Les relations de Peano dans les bases de données géographiques*, Proc. AUTO-CARTO 8, 1987.
- [LEE] D. Lee : *Cartographic generalization*, 1992.
- [LEN] U. Len : *Some preliminary thoughts on multiple representation*, Proc. NCGIA, 1989.
- [LI, OPENSHAW] Z. Li & S. Openshaw : *A natural principle for the objective generalisation of digital map data*, 1990.
- [LI, OPENSHAW] Z. Li & S. Openshaw : *Algorithms for automated line generalization based on natural principle of objective generalization*, 1990.
- [LUKATELA] H. Lukatela : *Hipparchus data structures : Points, lines and regions in spherical Voronoï grid*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 164-170, 1989.
- [MACKANES, BEARD] W. Mackanes & K. Beard : *Development of an interface for user interaction in rule based map generalization*, Proc. GIS/LIS, pp. 107-116, 1990.
- [MACKANES] W. Mackanes : *Integration and evaluation of map generalization*, Map generalization, 1991.
- [MAC DERMOTT, STEELE] J. Mac Dermott & B. Steele : *Extending a knowledge-based system to deal with ad hoc constraints*, 1985.
- [MAC DONALD, CRAIN] CL. Mac Donald & IK. Crain : *Applied computer graphics in a geographic information system : Problems and successes*, IEE CG&A, vol. 10, pp. 34-39, 1985.
- [MAC MASTER, MONMONIER] RB. Mac Master & M. Monmonier : *A conceptual framework for quantitative and qualitative raster-mode generalisation*, Proc. American congress of surveying and mapping, 1989.
- [MAC MASTER, SHEA] RB. Mac Master & S. Shea : *Cartographic generalization in digital environment : a framework for implementation in a geographic information system*, Proc. American Congress of surveying and mapping, 1989.
- [MAC MASTER] RB. Mac Master : *Conceptual frameworks for geographic knowledge*, Map generalization, 1991.
- [MAC MASTER] RB. Mac Master : *Introduction to numerical generalization in cartography*, Cartographica, vol. 26, pp. 1-6, 1989.
- [MAC MASTER] RB. Mac Master : *Knowledge acquisition for cartographic generalization*, Proc. ICA, vol. 15, 1991.
- [MAC MASTER] RB. Mac Master : *Multiple representation*, Proc. NCGIA, 1989.
- [MAC MASTER] RB. Mac Master : *The integration of simplification and smoothing algorithms in line generalization*, Cartographica, vol. 26, pp. 101-121, 1989.
- [MAC NALLY et al] R. Mac Nally, M. Dobson & J. Mac Avoy : *Multiple representations : position statement*, Proc. NCGIA, 1989.
- [MANSART, LIARD] V. Mansart & J. Liard : *De l'utilité des SGBD objets en cartographie militaire*.
- [MARK, FRANCK] D. Mark & AU. Frank : *Concepts of space and spatial language*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 538-555, 1989.
- [MARK] D. Mark : *Competition for map space as a paradigm for automated map design*, Proc. GIS/LIS, pp. 96-106, 1990.

- [MARK] D. Mark : *Object modelling and phenomenon-based generalization, Map generalization*, 1991.
- [MARK] D. Mark : *The importance of a cognitive science perspective for the design of geographic DB*, Proc. ESF, 1992.
- [MARK, BUTTENFIELD] M. Mark & B. Buttenfield : *Design criteria for a cartographic expert system*, Proc. Les SE et leurs applications, pp. 413-425, 1988.
- [MARK, CSILLAG] M. Mark & F. Csillag : *The nature of boundaries on "area-class" maps*, Cartographica, vol. 26, pp. 65-78, 1989.
- [MARK] M. Mark : *Conceptual basis for geographic line generalization*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 68-77, 1989.
- [MARK] M. Mark : *Multiple views of multiple representations*, Proc. NCGIA, 1989.
- [MARX] R. Marx : *Multiple representations*, Proc. NCGIA, 1989.
- [MENKE] K. Menke : *Phocus for cartographic applications*, Proc. of the Photogrammetric Week, vol. 43, pp. 115-121, 1991.
- [MERELLI et al] D. Merelli, P. Mussio & M. Padula : *An approach to the definition, description and extraction of structures in binary digital images*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 31, pp. 19-49, 1985.
- [MEYER] U. Meyer : *Bausteine zur automationsgestützten generalisierung von siedlungen für die einrichtung digitaler landschaftsmodelle*, 1987.
- [MEYNARD] C. Meynard : *Modélisation des données de la BD Carto en vue de la généralisation automatique*, 1989.
- [MOLENAAR] Molenaar : *Object hierarchies and uncertainty in GIS or why is standardisation so difficult?*, 1991.
- [MOLNAR] L. Molnar : *Principles for a next edition of the digital elevation modeling system SCOP*, Proc. ISPRS, vol. 4, pp. 962-968, 1992.
- [MONMONIER] M. Monmonier : *Interpolated generalization : Cartographic theory for expert-guided feature displacement*, Cartographica, vol. 26, pp. 43-63, 1989.
- [MONMONIER] M. Monmonier : *Raster mode area generalization for land use and land cover maps*, Cartographica, vol. 4, n° 20, pp. 65-91, 1983.
- [MONMONIER] M. Monmonier : *Role of interpolation in feature displacement, Map generalization*, 1991.
- [MOREAU] E. Moreau : *Application à la cartographie des modèles numériques de terrain, calculés par la méthode de la grille élastique*, Rapport de stage effectué au COGIT, Service de la Recherche, IGN - 1992.
- [MOUNYOL] R. Mounyol : *Etude comportementale d'un modèle des données*, AFCET/Interfaces, n° 108, pp. 12-17, 1991.
- [MOWER] JE. Mower : *Name placement of point features through constraint propagation*, Proc. Spatial data handling, vol. 2, pp. 65-73, 1986.
- [MÜLLER, MOUWES] JC. Müller & PJ. Mouwes : *Knowledge acquisition and representation for rule based map generalization : an example from the Netherlands*, Proc. GIS/LIS, pp. 58-67, 1990.
- [MÜLLER, WANG] JC. Müller & Z. Wang : *Area-patch generalization : a competitive approach*, 1991.
- [MÜLLER, WANG] JC. Müller & Z. Wang : *Coast line generalization*, 1991.
- [MÜLLER] JC. Müller : *Advances in cartography*, 1991.
- [MÜLLER] JC. Müller : *Building knowledge tanks for rules based generalization*, Proc. ICA, vol. 15, pp. 257-266, 1991.
- [MÜLLER] JC. Müller : *Rule based generalization : Potentials and impediments*, 1991.
- [MÜLLER] JC. Müller : *Implementation strategies for data visualization and generalization in GIS*, 1991.
- [MÜLLER] JC. Müller : *The removal of spatial conflicts inline generalization*, Cartography and GIS, vol. 17, n° 2, pp. 147-149, 1990.
- [MÜLLER] JC. Müller : *Rule based generalization*, 1990.
- [MÜLLER] JC. Müller : *Theoretical considerations for automated map generalization*, ITC Journal, vol. 3, pp. 200-204, 1989.
- [MÜLLER] JC. Müller : *Fractal dimension and inconsistencies in cartographic line representations*, The Cartographic Journal, vol. 23, pp. 123-130, 1986.
- [MÜLLER] JC. Müller : *Visual versus computerized seriation : The implications for automated map generalization*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 277, 1983.
- [NAGAI et al] N. Nagai, K. Nishi & K. Nakagawa : *Computer-assisted contour generalization using the GIS's digital cartographic data*.
- [NICKERSON] B. Nickerson : *Knowledge engineering for generalization*, Map generalization, 1991.
- [NYERGES] T. Nyerges : *Representing geographical meaning*, Map generalization, 1991.
- [OOMMEN, KASHYAP] J. Oommen & RL. Kashyap : *Scale preserving smoothing of islands and lakes*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 243-251, 1983.
- [OPHEIM] H. Opheim : *Fast data reduction of a digitized curve*, Geo-Processing, pp. 33-40, 1982.
- [PAYNE] RL. Payne : *Geographic names information system : an automated procedure of data verification*, Proc. AUTO-CARTO 5, pp. 575-580, 1982.
- [PERNOT] M. Pernot : *Etude d'un système de rédaction cartographique*, Rapport de DEA SIG de l'ENSG, 1989.
- [PERNOT] M. Pernot : *Règles de placement des toponymes ponctuels*, Rapport IGN.
- [PEUCKER] T. Peucker : *A theory of the cartographic line*, International Yearbook of Cartography, pp. 134-143, 1976.
- [PILO, VACCARI] D. Pilo & C. Vaccari : *An automated map production system for the italian state owned telephone company*, Proc. AUTO-CARTO 5, pp. 621-627, 1982.
- [POWITZ] B. Powitz : *Automationsgestützte generalisierung von verkehrswegedarstellungen*, 1987.

- [POWITZ] B. Powitz : *Computer-assisted generalization. An important software-tool in GIS*, Proc. ISPRS, vol. 4, pp. 664-672, 1992.
- [RHIND] D. Rhind : *Geographical information systems and cartography*, Kartographisch Tijdschrift, 1990.
- [RICHARDSON, MÜLLER] D. Richardson & JC. Müller : *Rule selection for small-scale map generalization*, Map generalization, 1991.
- [ROESSEL] J. Roessel : *An algorithm for locating candidate labelling boxes within a polygon*, Proc. AUTO-CARTO 8, pp. 689-700, 1987.
- [RUAS] A. Ruas : *Compte-rendu de la présentation du logiciel de généralisation à l'IGUG, mai 1992, rapport*, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - 1992.
- [RUAS] A. Ruas : *Etat de l'art en généralisation*, Rapport IGN - COGIT, 1992.
- [RUAS] A. Ruas : *Généralisation d'immeubles*, Rapport IGN - COGIT, 1988.
- [RUAS] A. Ruas : *Résumé d'articles sur la généralisation*, Rapport IGN - COGIT, 1992.
- [SALICHTCHEV] K. Salichtchiv : *History and contemporary development of cartographic generalization*, International Yearbook of Cartography, pp. 158-172, 1976.
- [SCHIMDT, POWITZ] CA. Schmidt & B. Powitz : *Aspects of computer-assisted generalization for large scale maps*, Proc. ICA, vol. 15, pp. 267-275, 1991.
- [SCHWARZ] C. Schwarz : *Position statement on the problem of multiple representations*, Proc. NCGIA, 1989.
- [SCHWEINFURTH] G. Schweinfurth : *Höhenliniengeneralisierung mit methoden der digitalen bildverarbeitung*, 1989.
- [SCHYLBERG] L. Schylberg : *Cartographic amalgamation of area objects*, Proc. ISPRS, vol. 4, pp. 135-138, 1992.
- [SCHYLBERG] L. Schylberg : *Knowledge based area generalization of topographic raster data*, 1992.
- [SCHYLBERG] L. Schylberg : *Rule based area generalization of digital topographic map area*, 1992.
- [SHAHRARAY, ANDERSON] B. Shahraray & D. Anderson : *Uniform resampling of digitized contours*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 6, 1985.
- [SHEA] S. Shea : *Design criteria for an artificially intelligent system*, Map generalization, 1991.
- [TAMM-DANIELS] FL. Tamm-Daniels : *The application of structured systems analysis to the development of an automated mapping system*, Proc. AUTO-CARTO 5, pp. 659-666, 1982.
- [TEH, CHIN] CH. Teh & R. Chin : *On digital approximation of moment invariants*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 33, pp. 318-326, 1986.
- [TENG et al] A. Teng, S. Joseph & A. Shojaei : *Polygon overlay processing : a comparison of pure geometric manipulation and topological overlay processing*, Proc. Spatial data handling, page 102, 1986.
- [THAPA] K. Thapa : *Automatic line generalization using zero-crossings*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 4, n° 54, pp. 511-517, 1988.
- [THAPA] K. Thapa : *Data compression and critical points detection using normalized symmetric scattered matrix*, Proc. AUTO-CARTO 9, pp. 78-89, 1989.
- [TOBLER] WR. Tobler : *Numerical map generalization*, Cartographica, vol. 26, pp. 9-25, 1989.
- [URABE] B. Urabe : *Automatic-compilation of contour lines by local DTM method*, Proc. ISPRS, vol. 4, pp. 861-867, 1992.
- [VAN HORN] E. Van Horne : *Generalizing cartographic data bases*, Proc. AUTO-CARTO 7, pp. 532-540, 1986.
- [VOYER] R. Voyer : *Moteurs de systèmes experts - Résumé*, 1987.
- [WALL, DANIELSSON] K. Wall & PE. Danielson : *A fast sequential method for polygonal approximation of digitized curves*, Computer Vision, Graphics & Image Processing, vol. 28, pp. 220-227, 1984.
- [WANG et al] M. Wang, P. Gong & P. Howard : *Thematic mapping from imagery : an aspect of automated generalization*, Proc. AUTO-CARTO 10, pp. 123-131, 1991.
- [WEBER] W. Weber : *Automationsgestützte generalisierung*, Nachrichten aus dem Kartem & Vermessungswesen, n° 88, pp. 77-109, 1982.
- [WEIBEL] R. Weibel : *Amplified intelligence and rule-based systems*, Map generalization, 1991.
- [WEIBEL] R. Weibel : *Multiple representations of what? or the fuzzy nature of spatial data*, Proc. NCGIA, 1989.
- [WEIBEL] R. Weibel : *Specification for a platform to support research in map generalization*, Proc. ICA, 1991.
- [WHITE] M. White : *Tribulations of automated cartography and how mathematics helps*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 408-418, 1983.
- [WILLKOMMEN] P. Willkommen : *Computer-assisted cartographic generalization and its practical application with Phocus*, Proc. ISPRS, pp. 139-142, 1992.
- [WILSKI] L. Wilski : *Problems in establishing and updating a digital cartographic data base at the millionth scale*.
- [WOOD, DOUGLAS] B. Wood & D. Douglas : *Cartographic feature coding*, Proc. AUTO-CARTO 6, pp. 616-626, 1983.
- [WU, MACKANES] C. Wu & W. Mackanes : *Automatic contour labelling for scanned topographic maps*, Proc. ISPRS, vol. 4, pp. 265-269, 1992.
- [WYBO, COTTALORDA] JL. Wybo & JL. Cottalorda : *Un système expert temps réel et graphique : EXPERTGRAPH. Présentation de son application à la prévention des incendies de forêt.*, 1988.
- [YOELI] P. Yoeli : *The logic of automated map lettering*, The Cartographic Journal, vol. 12, page 99, 1972.
- [ZHANG, TULIP] G. Zhang & J. Tulip : *An algorithm for the avoidance of sliver polygons and clusters of points in spatial overlay*, Proc. Spatial data handling, pp. 141-150, 1990.
- [ZORASTER, BAYER] S. Zoraster & S. Bayer : *Practical experience with a map label placement program*, Proc. AUTO-CARTO 8, pp. 701-708, 1987.

## 4.2.2 Développement et tests d'algorithmes de généralisation automatique

par Jean-Georges AFFHOLDER et François LECORDIX

### 4.2.2.1 Contexte - Objectifs

La recherche et le développement en généralisation sont jusqu'à présent articulés autour de deux axes : l'algorithmique et les systèmes à base de règles.

L'approche purement algorithmique a depuis longtemps fait la preuve de sa faiblesse : les nombreux algorithmes de généralisation (lissage, simplification, caricature d'immeubles...) que l'on trouve dans la littérature permettent de répondre à des problèmes précis mais sont rarement intégrables à un système global, étant donné qu'ils négligent totalement les objets environnants, d'où l'intérêt des systèmes à base de règles : un Système Expert (Système à base de connaissances, capable de simuler un raisonnement en utilisant ces connaissances, les connaissances étant représentées par des faits et des règles, et le raisonnement étant basé sur l'enchaînement des règles) qui sera utilisé pour détecter et résoudre les conflits de proximité et de superposition entre les objets. C'est là l'objet de la recherche décrite en 4.2.1 (généralisation cartographique fondée sur l'Intelligence Artificielle).

Il existe toutefois certaines catégories de problèmes pour lesquelles la recherche de nouveaux algorithmes de généralisation reste prometteuse : cela résulte de l'étude de certains classiques de la littérature cartographique, (cf. notamment l'étude réalisée en 1973 par la Société Suisse de Cartographie, écrite en-dehors de toute idée d'automatisation) ainsi que de certaines remarques du Bureau d'Etudes Cartographiques de l'IGN (BEC). D'où cette recherche qui, à la suggestion du BEC, s'est surtout orientée jusqu'à présent vers la généralisation du routier en montagne à partir de la BDCarto. C'est dans ce contexte que nous avons été amenés à développer, en vue de la généralisation, une représentation du linéaire routier par des arcs de cubique, en partant du fait qu'un virage peut se décomposer en une clothoïde (courbe où la courbure en un point est fonction linéaire de l'abscisse curviligne, cf. [B-90]) d'entrée, un arc de cercle et une clothoïde de sortie. La clothoïde étant une courbe transcendante, on préférera approximer l'ensemble clothoïde + moitié de l'arc de cercle précédent par une courbe algébrique unique, en l'occurrence, un arc de cubique d'équation dans le système local  $y = a \cdot x^3$ , ( $x$  variant de 0 à une valeur  $x_f$ ). Les algorithmes de modélisation développés en 1991 souffraient d'un certain nombre de faiblesses : une partie importante de notre recherche pour 1992 a consisté à les améliorer, mais nous abordons ici l'inventaire des résultats.

Il importe enfin de préciser que, sauf exceptions ([B-85], [KB-91]), la littérature sur la généralisation du linéaire traite peu des problèmes liés à la symbolisation : en d'autres termes, on ne prend que rarement en compte le fait que les routes soient symbolisées aux petites et aux moyennes échelles par des objets surfaciques. C'est pourtant ce fait qui est la cause principale des conflits : nous avons commencé à l'intégrer à notre étude, mais les recherches sur ce point devront se poursuivre en 1993.

Afin de pouvoir tester facilement les algorithmes de généralisation sur n'importe quelles données IGN, une plate-forme de généralisation a commencé à être développée au cours de l'année. Par une approche de type intelligence amplifiée [W 91], cette plate-forme doit permettre de réaliser des opérations de généralisation automatique ou interactives.

### 4.2.2.2 Activité / Résultats

Au cours de l'année 1992, les résultats ont porté sur, outre la modélisation du routier que nous venons d'évoquer, la détection des conflits liés à la symbolisation et un certain nombre de programmes développés dans une optique boîte à outils.

- Les algorithmes de modélisation par cubiques

Dès le départ, nous nous sommes heurtés à un dilemme : allons-nous essayer de conserver intégralement l'information de départ (auquel cas, on pourrait effectivement parler de modélisation), ou allons-nous déjà introduire un lissage à cette étape du traitement ? Finalement, nous avons opté pour un compromis, en acceptant de perdre de l'information qui cesserait d'être significative dès que l'on passerait à une échelle inférieure.

Partant donc de la représentation par segments, il est naturel de définir les points d'inflexions comme les milieux des segments correspondant à un changement de concavité et de définir les systèmes locaux à partir de ces segments. C'est ce qui a été fait dans les deux premières versions du programme.

Ceci introduisait cependant des "micro inflexions", que nous avons cherché à éliminer dans la version 3.

### Version 1

$\varphi$  angle polaire de la tangente au point d'inflexion, est figé et pris égal à l'angle polaire du segment qui porte ce point. D'autre part, on définit a priori les sommets comme les points où la courbure est maximale; on recherchera donc, entre deux P.I., le point M tel que l'angle  $M_{i-1} M_i M_{i+1}$  soit minimal; en fonction de ce point, on déterminera les deux valeurs de a (paramètres de l'équation  $y = a.x^3$ ) correspondant aux deux P.I.; à ce moment, tous les éléments de définition de nos arcs de cubique (éléments de passage du système général au système local, paramètre a et valeur limite  $x_f$  de x) sont connus. On remarque que cette façon de procéder risque de créer des contraintes qui ne sont pas justifiées, dans la mesure où l'on n'a pas tenu compte de la précision des données de départ.

### Version 2

Les sommets sont définis comme les points permettant d'approximer au mieux le tronçon compris entre deux P.I., au moyen de deux arcs de cubiques : on fige uniquement les P.I. et l'on cherche les couples  $(\varphi, a)$ , tels que les arcs de cubique correspondants approximent l'arc en amont et en aval le plus longtemps possible. L'algorithme utilisé peut se résumer comme suit :

- on détermine brutalement les P.I., comme dans la version 1, mais on détermine pour chacun les valeurs extrêmes de  $\varphi$  ( $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ ), correspondant à la précision des données de départ,
- pour chaque P.I., on essaie, en jouant sur  $\varphi$  et a, d'aller le plus loin possible en avant et en arrière, sans toutefois dépasser le P.I. suivant (recherche avant) ou précédent (recherche arrière). Prenons pour fixer les idées le cas de la recherche avant : pour que l'arc de cubique passe à une distance du point  $M_j$  compatible avec la tolérance fixée, il faut que a soit compris entre deux valeurs limites  $a_{min}$  et  $a_{max}$ ; on associe ainsi à  $M_j$  un trapèze mixtiligne correspondant aux deux fonctions  $a_{min}(\varphi)$  et  $a_{max}(\varphi)$  pour  $\varphi$  variant de  $\varphi_1$  à  $\varphi_2$ .

On déterminera les intersections successives des trapèzes et l'on s'arrêtera à la dernière intersection non vide, correspondant à un point donné  $M_{k1}$ . De même, la recherche arrière depuis le P.I. suivant aboutira à un point  $M_{k2}$ . Le cas  $k_1 < k_2$  est rarissime et nous ne nous en occuperons pas ici. Evidemment, si  $k_1 = k_2$ , i.e. si ces deux arcs aboutissent au même point, on aura résolu le problème de la définition du sommet du virage. Mais dans le cas le plus fréquent,  $k_1$  est supérieur à  $k_2$  : l'expérience a montré que le point de rang égal à la moyenne de  $k_1$  et  $k_2$  correspond bien à l'idée que l'on se fait du sommet. Il reste à recalculer les deux couples  $(\varphi, a)$ . Pour un P.I. et un sommet donné, le couple retenu sera celui pour lequel la somme des carrés des distances des points concernés à la cubique sera minimum, sans qu'aucun de ces points n'en soit plus éloigné que la tolérance fixée.

#### • Remarques :

- l'expérience nous a montré que si l'on s'en tenait strictement à la règle ci-dessus, on pouvait se trouver fréquemment dans le cas où le milieu d'un segment s'éloigne de la cubique de plus que la tolérance : on a donc, dès le départ, doublé les points donnés par des points intermédiaires,
- en un P.I. donné, les deux demi-tangentes au point d'inflexion ne coïncident plus rigoureusement, et de même, les cubiques avant et arrière correspondant à un même sommet aboutissent à deux points distincts mais cela n'a pas d'importance pour la suite des opérations,
- il est bien entendu que les fonctions  $a_{min}(\varphi)$  et  $a_{max}(\varphi)$  ne sauraient être explicitées : le programme utilise des variations discrètes, en s'efforçant de garder un bon compromis entre la rigueur du résultat et le maintien du temps CPU dans des limites acceptables.

La méthode que nous venons de décrire a comme inconvénient de n'établir aucune hiérarchie dans les inflexions. Prenons en effet le cas assez fréquent où un certain nombre de segments consécutifs correspondent chacun à un changement de concavité : on sera alors dans le cas trivial où chaque arc de cubique se réduira à la moitié d'un de ces segments, et où les sommets se réduiront aux points donnés initiaux. Aussi avons-nous développé une version destinée à éliminer les "micro-inflexions", qui par la même occasion nous assurera un bien meilleur compactage des données.

### **Version 3.**

Après avoir, comme dans les deux versions précédentes, déterminé dans un premier temps l'ensemble des P.I. (n.b. : les deux extrémités de la ligne sont considérés comme des P.I.), partant du premier P.I., on fait une recherche avant le plus loin possible, i.e., sans s'occuper de savoir si l'on a dépassé des P.I. Soit S le dernier point atteint. On testera successivement les différents P.I. en aval de S pour savoir quel est le dernier qui permette d'atteindre S en recherche arrière. Pour ne pas atteindre des temps CPU (ainsi qu'une complexité de programmation) rédhibitoires, nous avons renoncé à jouer sur a, nous contentant de jouer sur  $\varphi$ , de sorte que les cubiques passent rigoureusement par S.

Si pour le moment, cette modélisation (aussi bien dans la version 2 que dans la version 3) s'est bien prêtée à la détection des zones de conflit, et essentiellement à la détection des zones d'empâtements liés à la symbolisation (problème de la largeur du signe conventionnel) il reste à l'exploiter dans le développement des algorithmes de simplification et de caricature, mais dès à présent il apparaît que les versions actuelles devront être améliorées par une hiérarchisation des P.I. : nous reviendrons sur ce point dans la partie "Objectifs".

#### – La détection des conflits

La modélisation du routier d'une feuille donnée ayant été effectuée comme indiqué ci-dessus, le programme recherchera, en fonction de la largeur du signe conventionnel, les conflits entre arcs de cubique et mettra dans un nouveau fichier, pour chaque arc en conflit, les limites (i.e., les valeurs correspondantes de x dans l'équation  $y = a.x^3$ ) de la zone de conflit.

Cette recherche se fait en trois temps :

- recherche au sein de chaque polyligne (on essaie d'éviter l'explosion combinatoire mais on peut signaler, à titre de curiosité, que l'expérience nous a montré que deux arcs dont les rangs au sein de la même polyligne différaient de plus de 40 pouvaient être en conflits),
- recherche au voisinage des noeuds,
- recherche au sein de chaque dalle, ce qui implique une régionalisation préalable : la taille des dalles a été choisie, après un certain nombre de tests, de façon à optimiser la recherche.

#### – Programmes divers

Dans le cadre de notre recherche, nous avons été amenés à développer quelques programmes de tests d'algorithmes existant dans la littérature (algorithme de DOUGLAS et PEUCKER [DP-73]; méthode des cercles de contrainte [OK-83]) ou déjà utilisés à l'IGN, des programmes de visualisation, des algorithmes de déplacements amortis, ainsi que certains programmes de résolution de problèmes généraux (aspect "boîte à outils"). C'est ainsi que le résultat du scannage de planches mères du 1 : 100 000 et du 1 : 250 000, mis au format SEMIO modifié COGIT, permet de superposer à l'écran ou sur les sorties papier le routier correspondant à la BDCarto et à ces deux échelles (le tout remis évidemment à la même échelle), ce qui devrait aider à dégager un certain nombre des règles qui ont été utilisées implicitement lors de la généralisation manuelle, même si dans cette version on ne tient pas encore compte des contraintes liées notamment à la planimétrie.

#### – Plateforme de généralisation

Au cours de l'année, une structure a été définie permettant de gérer sur un même graphe des données ponctuelles, linéaires et zonales. Développées en ADA, une couche géométrique et une couche topologique ont été implémentées ainsi que les fonctions de base permettant de manipuler le graphe (création, destruction, ouverture, sauvegarde...) et les objets topologiques et métriques (création, destruction, modification de noeuds, d'arcs et de faces).

Grâce à une régionalisation du graphe par dalles rectangulaires et en utilisant une interface graphique X, la plate-forme permet de visualiser et de manipuler des éléments avec des temps de réponse satisfaisants quelque soit le volume de données. La visualisation des arcs et des noeuds peut être faite sans ou avec emprise cartographique suivant une légende du graphe à construire préalablement.

#### - Positionnement automatique des écritures

S'appuyant sur la structure de graphe définie pour la plate-forme, un programme de placement des noms de communes sur le 1 : 100 000 a été développé en ADA par F. CHIRIE au cours de son stage de DEA. Ce placement tient compte du contexte cartographique (mutilation de routes, éloignement par rapport à l'objet renseigné...) et des règles de positionnement des toponymes (position privilégiée, non chevauchement des noms...) Ce logiciel fournit donc une quantification de la qualité d'une position d'un nom et teste un grand nombre de positions différentes. Enfin par une stratégie simple (séquentielle) de choix de position, le logiciel détermine, pour l'ensemble des noms, la meilleure position pour chaque nom [C-92]. Cette étude a été complétée par F. LECORDIX par un essai sur la BDMillion comparé avec un placement manuel; les résultats sont très prometteurs : 60% de positionnement de qualité cartographique; avec quelques améliorations, on devrait atteindre 80 à 90% [L-92].

#### 4.2.2.3 Prolongements envisagés

La priorité est, à partir des programmes de visualisation simultanée des données initiales, de leur modélisation, et du résultat de la généralisation manuelle, d'arriver à expliciter les règles de généralisation, quitte à affiner notre modélisation. Dans un premier temps, nous pensions pouvoir déjà arriver à des résultats intéressants en prenant comme variables principales la distance entre deux P.I. consécutifs et la flèche.

Actuellement, nous pensons que nous n'arriverons à rien d'exploitable si nous n'affinons pas la modélisation, notamment par une hiérarchisation des P.I.

En ce qui concerne la plateforme, les recherches vont se concentrer sur les opérateurs de généralisation : déplacements d'objets, lissages et caricatures (intégration des travaux sur les cubiques). De plus une couche géographique devra être implémentée.

Pour le positionnement de toponymes, le programme sera transféré, avec certaines améliorations, sur la plate-forme. De nouvelles stratégies de placement seront implémentées (méthode par recuit simulé). De plus, un essai sera effectué sur la BDTopo pour positionner au 1 : 25 000 un plus grand nombre de toponymes (lieux habités, altitudes...). Enfin, un stage est proposé pour réaliser le positionnement des noms le long d'un axe.

#### 4.2.2.4 Références

- [B-85] [BUTTENFIELD] Buttenfield : *Treatment of the cartographic line*, Cartographica, vol. 22, 1985.
- [B-90] [BOULERIE] Boulerie : *Numérisation automatique pour la cartographie*, Mémoire d'Ingénieur IT3, ENSG, 1990.
- [BM-91] [BEARD, MACKANESS] K. Beard & Mackaness : *Generalization Operations and Supporting Structures*, AUTO-CARTO 10, vol. 6, pp. 29-45, 1991
- [C-92] [CHIRIE] F. Chirié : *Programme de positionnement automatique des noms de commune*, Rapport de DEA Sciences de l'Information Géographique, 1992.
- [DP-73] [DOUGLAS, PEUCKER] Douglas & Peucker : *algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature*, The Canadian Cartographer, vol. 10, n° 2 - décembre 1973.
- [KB-91] [BEARD] K. Beard : *Theory of the cartographic line revisited / Implications for automated generalization*, Cartographica, vol. 28, n° 4, 1991.
- [L-92] LECORDIX F. Lecordix : *Compte rendu de recherche sur le placement automatique de toponymes*, note DT 1174. du 28/10/1992.
- [M-90] [MÜLLER] J.C. Müller : *A knowledge based system for cartographic symbol design*, The cartographic Journal, juin 1990.
- [OK-83] [OOMEN, KASHYAP] Oomen & Kashyap : *Scale preserving smoothing and lakes*, AUTO-CARTO 6, 1983.
- [W-91] [WEIBEL] Weibel : *Amplified Intelligence and Knowledge\_based Systems for Map Generalization*, 1991.

# 5 - GÉODÉSIE

*par Pascal WILLIS*

## 5.1 SYSTEMES DE RÉFÉRENCE

### 5.1.1 Maintenance du système de référence terrestre de l'IERS

*par Zuheir ALTAMIMI*

#### 5.1.1.1 Contexte

Le 17 décembre 1986 a été signée une Convention relative à la participation de l'Observatoire de Paris, de l'IGN et du Bureau des Longitudes au fonctionnement du Bureau Central de l'IERS (International Earth Rotation Service).

Le rôle de l'IGN est d'assurer les travaux et les recherches nécessaires à la formation et à l'entretien du Système de Référence Terrestre de l'IERS. C'est en effet le rôle que l'IGN continue de jouer depuis la création de l'IERS en 1988.

La compétence de l'IGN dans ce domaine est reconnue ; elle se concrétise par des travaux et publications diffusés au niveau international et qui servent couramment de référence. Cette compétence est valorisée par la participation active de l'IGN aux différents programmes internationaux de mesure dans le domaine de la géodésie spatiale et de la rotation de la Terre, qui nécessitent l'établissement d'un système de référence terrestre global et précis.

#### 5.1.1.2 Objectifs

- Réalisation précise du Système de Référence Terrestre de manière régulière, par combinaison des données disponibles provenant des techniques spatiales : Interférométrie à très longue base (VLBI), Télémétrie laser sur la Lune (LLR) et sur satellite (SLR), Global Positioning System (GPS).

- Etude particulière des déplacements des stations dus aux mouvements des plaques tectoniques, mouvements locaux, rebond post-glaciaire...: comparaison des champs de vitesses des stations provenant des modèles géophysiques et géologiques et des techniques spatiales.

- Estimation d'un champs de vitesses par combinaison des données des techniques spatiales.

L'objectif est essentiellement métrologique, car on cherche avant tout la meilleure détermination possible (1mm) à la fois des coordonnées des stations et de leurs vitesses de déplacement. La réalisation de cet objectif passe notamment par la recherche d'une meilleure combinaison possible des différentes données des techniques spatiales.

#### 5.1.1.3 Activité - Résultats

Les principales actions menées en 1992 sont les suivantes :

- réalisation du système de référence terrestre de l'IERS pour 1991, ITRF91, comprenant à la fois les coordonnées des stations et les vitesses de déplacement de celles-ci :

- combinaison par moindres carrés de 16 jeux de coordonnées de stations : 5 VLBI, 3 LLR, 7 SLR et 1 GPS,

- combinaison par moindres carrés de 8 champs de vitesses de stations estimés par deux techniques spatiales VLBI et SLR.

Concrètement, les résultats de l'ITRF91 sont :

- coordonnées cartésiennes des stations exprimées dans un système unique qui est le système de l'IERS. Les coordonnées à l'époque de 1988.0 de 239 stations d'observation réparties dans 130 sites ont ainsi été estimées,

- les vitesses des 130 sites,

- les paramètres de transformation entre les systèmes individuels sous-jacents aux jeux de coordonnées et l'ITRF91,

- les variations temporelles des paramètres de transformation,

- publication des résultats dans le Rapport Annuel de l'IERS pour 1992,
- analyse détaillée de l'ITRF91 et la publication de cette analyse dans la Note Technique de l'IERS n° 12.

#### 5.1.1.4 Prolongements envisagés

- Réalisation du Système de Référence Terrestre de l'IERS pour 1992 : ITRF92. Cette réalisation comportera des nouvelles données VLBI, LLR, SLR et GPS. La contribution du GPS va être très importante dans cette réalisation, grâce à la campagne internationale de l'IGS en 1992.
- La qualité des données GPS obtenues actuellement étant comparable à celle du VLBI, une étude minutieuse de la pondération sera nécessaire afin d'obtenir la combinaison la plus réaliste possible statistiquement.
- Estimation d'un champ de vitesses de stations par combinaison de jeux de vitesses disponibles. Une étude de pondération est également prévue dans ce type de combinaison. Par ailleurs, une analyse comparative des mouvements des stations va être entreprise et en particulier pour les stations en bordure des plaques tectoniques, pour lesquelles les modèles géophysiques ne fournissent pas de mouvement.
- Une analyse théorique en vue de l'élaboration d'un logiciel de combinaison globale : positions et vitesses ; thèse de L. DUHEM .
- Publication d'une Newsletter contenant des informations sur la définition et la réalisation du système de référence terrestre de l'IERS,

#### 5.1.1.5 Références

- [BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & A. Altamimi : *The IERS GPS Terrestrial Reference Frame*, IERS Technical Note 10, Observatoire de Paris - 1992.
- [BOUCHER et al 91] C. Boucher, Z. Altamimi & L. Duhem : *The ITRF91 and its associated velocity field*. IERS Technical Note 12, Observatoire de Paris - 1991.
- [BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & A. Altamimi : *Le système de référence terrestre de l'IERS : Nouveau système de référence UAI/UGGI*, Journées 1992 systèmes de référence spatio-temporels, Observatoire de Paris.
- [ALTAMIMI et al 92] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Duhem : *The Worldwide Centimetric Terrestrial Reference Frame and its associated velocity field*, The World Space Congress, 29th Plenary Meeting of the COSPAR, Washington DC, (USA) - 1992
- [BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & A. Altamimi : *The EUREF Terrestrial Reference System and its first realizations*, EUREF Meeting Berne, March 4-6 - 1992.
- [BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & A. Altamimi : *The IERS Terrestrial Reference System*, 6th International Symposium on Satellite Positioning, Columbus, USA, March 17-20 - 1992.
- [BOUCHER et al 92] C. Boucher, A. Altamimi, J.Ph. Dufour & H. Fagard : *The IERS Terrestrial Reference Frame and its extensions by IGS and DORIS. Dynamics of the Solid Earth (DOSE) Meeting*, Greenbelt, (USA), 13-15 Oct - 1992.
- [BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & A. Altamimi : *Development of a Conventional Terrestrial Reference Frame*, CDP/AGU Monograph - 1992.

### 5.1.2 Théorie dynamique du mouvement de rotation de la Terre dans le cadre Post-Newtonien

par Denis PRIOU

#### 5.1.2.1 Contexte / Objectifs

L'objectif de cette action de recherche est de construire une théorie cohérente de la rotation de la Terre incluant les premières corrections relativistes à la théorie Newtonienne de la gravité (formalisme Post-Newtonien), de résoudre numériquement les équations obtenues afin de comparer les prévisions théoriques aux mesures expérimentales sur la rotation de la Terre, et d'étudier des phénomènes tels que la précession-nutation, les fluctuations de la durée du jour, le problème des modes normaux d'oscillation... L'enjeu est double : il s'agit tout d'abord de construire un formalisme d'une précision accrue ; l'enjeu véritable est cependant plus profond car cette démarche nécessite de redéfinir rigoureusement dans le cadre relativiste des concepts définis dans le cadre Newtonien, ce qui amène à une redéfinition complète des systèmes de référence. Cette recherche est menée en collaboration avec l'université de Tübingen (D), l'Observatoire de Paris et l'Observatoire de Meudon.

### 5.1.2.2 Activité - Résultats

Une théorie Post-Newtonienne générale des corps en rotation possédant une croûte solide et un noyau fluide a été développée. Cette théorie a pour but d'étudier toutes les petites perturbations (d'origines diverses) d'une configuration axisymétrique en rotation (baptisée "non perturbée"). Cette configuration non perturbée a été étudiée dans un premier temps et le système complet (c'est-à-dire un système d'équations aux dérivées partielles assorti de conditions de régularité et de conditions aux limites) décrivant cette configuration a été écrit sous une forme adaptée à sa résolution numérique. Il faut bien entendu insérer dans la théorie un modèle physique de l'intérieur du corps. Le résultat de ce travail est un modèle numérique servant de donnée d'entrée pour le problème des petites perturbations autour de la configuration non perturbée.

La configuration "perturbée" décrivant les petites perturbations autour de la configuration non perturbée a été étudiée. Le système d'équations et les conditions aux limites ont été écrites. Le formalisme développé permet de décrire tout type de perturbation, en particulier les fluctuations de la durée du jour et le problème des modes normaux d'oscillation.

La résolution numérique des équations décrivant les configurations non perturbée et perturbée est actuellement en cours. Une nouvelle approche est étudiée. Celle-ci est basée sur le formalisme ADM (ARNOWITT-DESER-MISNER, ou formalisme  $3 + 1$ ) et sur l'utilisation des méthodes pseudo-spectrales, qui fournissent un cadre numérique permettant d'obtenir des résultats d'une très grande précision, et de gérer convenablement les conditions aux limites à l'infini imposées par le problème par compactification de l'espace d'intégration. L'ensemble des résultats obtenus se trouve dans trois publications qui vont être soumises pour publication.

Par ailleurs, un formalisme rigoureux et complet (c'est-à-dire sans aucune approximation) de la rotation de la Terre, tenant compte de tous les termes non diagonaux du tenseur d'inertie de la Terre, et capable de prendre en compte de nouvelles mesures IERS, est actuellement en cours. Les motivations de ce travail sont observationnelles et théoriques. Sur le plan observationnel, ce travail est motivé par des mesures IERS récentes qui montrent des variations pseudo-périodiques et non périodiques ne semblant pas pouvoir faire l'objet d'une interprétation dans le cadre des modèles de rotation de la Terre actuellement disponibles. Une interprétation envisagée de ces variations est qu'elles sont dues à l'influence combinée du noyau et de l'atmosphère, ce qui a un impact sur l'ensemble des termes diagonaux et non diagonaux du tenseur d'inertie de la Terre. L'objectif est de clarifier les contributions potentielles spécifiques de chaque terme et de ses variations aux observations, et de mettre en lumière les liens entre ces quantités théoriques et les nouvelles mesures IERS. Etant donné l'extrême précision de ces mesures, celles-ci sont particulièrement bien adaptées à la mise en évidence de phénomènes jusqu'à présent non détectés et à l'étude de leur lien avec des quantités théoriques négligées jusqu'à présent. Sur le plan théorique, il s'agit de construire un formalisme Hamiltonien complet, rigoureux et esthétique, et d'attirer l'attention sur le rôle nouveau que pourrait jouer l'ensemble des composantes du tenseur d'inertie : celles-ci pourraient être considérées non plus comme de pures quantités théoriques, mais comme des variables dans la pleine acceptation du terme, c'est-à-dire comme d'authentiques paramètres de modélisation de la Terre.

### 5.1.2.3 Prolongements envisagés

Le travail de résolution numérique doit être poursuivi jusqu'à son terme. Le logiciel ainsi réalisé constituera un véritable outil de simulation permettant d'étudier tous les phénomènes perturbatifs de la rotation de la Terre (modes propres d'oscillation...).

### 5.1.2.4 Références

- [PRIOU et al] D. Priou, G. Comer & S. Bonazzola : *General relativistic rotating bodies in the  $3 + 1$  formalism : a numerical investigation*, à soumettre à "Physical Review".
- [PRIOU et al] D. Priou, G. Comer & S. Bonazzola : *General relativistic rotating bodies with a magnetic field*, à soumettre à "Physical Review".
- [PRIOU et al] D. Priou, M. Leins & P. Haensel : *L : 2 torsional oscillations of general relativistic bodies with a solid crust*, à soumettre à "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society".
- [KUBO 91] Y. Kubo : *Celestial Mechanics*, vol. 50, pp. 165-87 - 1991.
- [KINOSHITA 77] H. Kinoshita : *Celestial Mechanics*, vol. 15, pp. 277-326 - 1977.
- [KINOSHITA, SASAO92] H. Kinoshita & T. Sasao : *Theoretical aspects of Earth rotation* - 1992.

### 5.1.3 Etude des systèmes de référence liés au projet franco-américain Topex/Poséïdon

*par Pascal Willis*

#### 5.1.3.1 Contexte / Objectifs

Le but principal est d'évaluer en terme d'exactitude les différents systèmes de référence sous-jacents aux différents jeux de coordonnées liés au projet Topex (réseaux de stations de poursuite satellitaires, marégraphes). Il s'agit simultanément d'évaluer les effets systématiques liés à l'utilisation de systèmes de référence terrestres différents (voire de donner des tables de correction pour les orbites du satellite à l'usage des océanographes), ainsi que de fournir un jeu de coordonnées le plus précis possible de stations de poursuite (Laser, DORIS, GPS) et de marégraphes à l'usage des groupes de calculs d'orbite et des océanographes. Le choix du projet Topex/Poséïdon pour cette étude vient de l'utilisation simultanée de 3 systèmes de poursuite satellitaires (Laser, DORIS, GPS). Une autre application est l'étude de calculs d'orbite précis mettant en jeu plusieurs techniques (dans cette étude GPS et DORIS) en vue de rechercher les différents systématismes résiduels (concernant à la fois les mesures et les modèles). Cette recherche est menée en collaboration avec le CERGA, le CNES et le JPL.

#### 5.1.3.2 Activité - Résultats

Les six premiers mois de l'année ont été consacrés à l'étude d'un nouveau logiciel permettant de comparer et de combiner différents jeux de coordonnées (soit des stations terrestres, comme les différents réseaux de poursuite ou des marégraphes, soit des positions instantanées de satellite). Cette étude a débouché sur la présentation de mémoire de DEA de F. CADOT [CADOT F. 1992] ainsi qu'une publication dans un congrès. Le document de spécification du logiciel est, de son côté, pratiquement achevé.

La campagne d'observation de terrain (GPS, VLBI) en Méditerranée, qui était prévue pour 1992, a du être reportée en 1993 pour des raisons principalement politiques ainsi que des raisons d'indisponibilité des matériels. Des contacts ont déjà été pris par le SGN (M. LE PAPE) avec les différents organismes afin d'organiser cette campagne. Elle doit servir en outre à augmenter les collocations entre les différentes techniques de positionnement, à localiser des marégraphes dans un système de référence mondial bien défini, ainsi qu'à rattacher entre eux les différents réseaux géodésiques nationaux situés en Méditerranée Occidentale (Tunisie, Algérie, Maroc, Espagne, France, Italie). Il faut noter que cette campagne est cofinancée par plusieurs pays et que, pour la France, les observations sont cofinancées par l'IGN (vocation et recherche) et par le Programme National de Télédétection Spatiale.

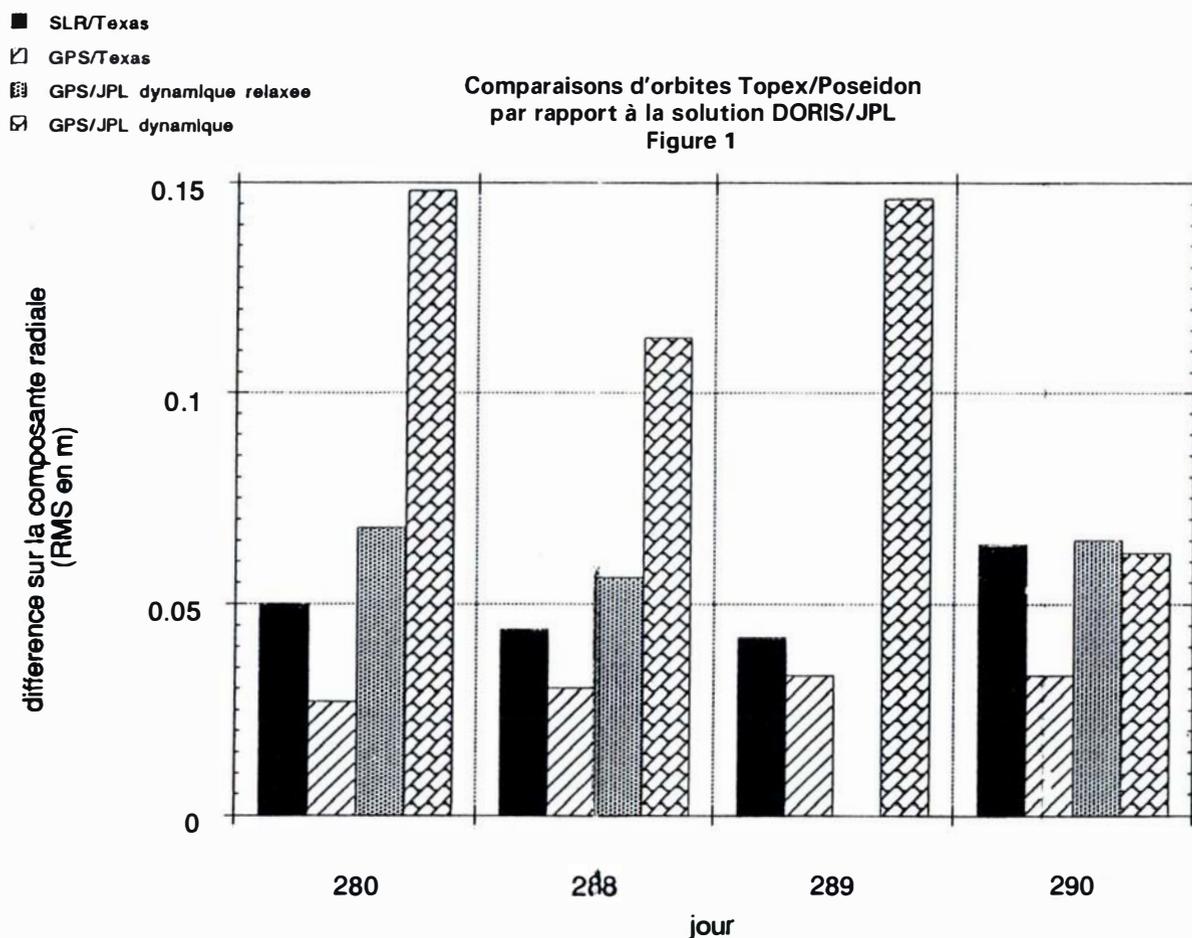
Le satellite Topex/Poséïdon ayant été lancé avec succès en Août 1992, les premières données ont été reçues rapidement et ont pu être traitées avec succès. Cette partie de la recherche correspond au séjour de P. WILLIS au JPL (du 16/9/92 au 7/4/93). Ce séjour est cofinancé par l'IGN, le Groupe de Recherche en Géodésie Saptiale (GRGS) ainsi que le Programme National de Télédétection Spatiale. La première partie du séjour a consisté à reprendre les développements effectués lors d'un séjour précédent afin de modifier la nouvelle version logiciel UNI du JPL (GIPSY-OASIS II) pour pouvoir traiter des mesures DORIS. Cette étude a été essentiellement appuyée sur les travaux déjà effectués par le JPL pour la technique GPS. Dans un premier temps, quelques jours ont été sélectionnés (octobre 1992) afin de comparer les orbites obtenues par le JPL et l'Université du Texas pour chacune des techniques : Laser, DORIS et GPS. La figure 1 montre que l'ensemble des orbites obtenues sont cohérentes au niveau de quelques cm et qu'en particulier, l'orbite DORIS calculée avec le nouveau logiciel est tout à fait au même niveau de précision que les autres. Dans un deuxième temps, avant d'effectuer des calculs d'orbite utilisant simultanément les mesures DORIS et GPS, une première étude a été conduite pour comparer l'estimation par Doris et par GPS de la composante de la correction troposphérique. La figure 2 montre l'existence d'un systématisme de l'ordre de plusieurs centimètres sur ce paramètre entre les deux techniques. Ce point nécessite d'être étudié plus en détail. Ces premiers résultats ont été présentés à l'AGU dans le cadre d'une présentation invitée [WG. MELBOURNE et al].

Afin de pouvoir calculer un jeu de vitesses pour les balises DORIS, des calculs de localisation ont été entrepris à partir des données DORIS récentes sur Topex ainsi que des données DORIS plus anciennes sur le satellite SPOT-2 (1990). Les premiers résultats montrent qu'avec un jour de données

DORIS seulement, en utilisant le nouveau champ de gravitation JGM-1 (champ préliminaire au projet Topex), il est possible d'obtenir des exactitudes de positionnement pour les bal-2 (environ 10 fois mieux que ce qui était fait avec SPOT-2 et le champ de gravitation GRIM4-S2). Des solutions mensuelles sont en cours de calcul afin d'améliorer encore ces résultats.

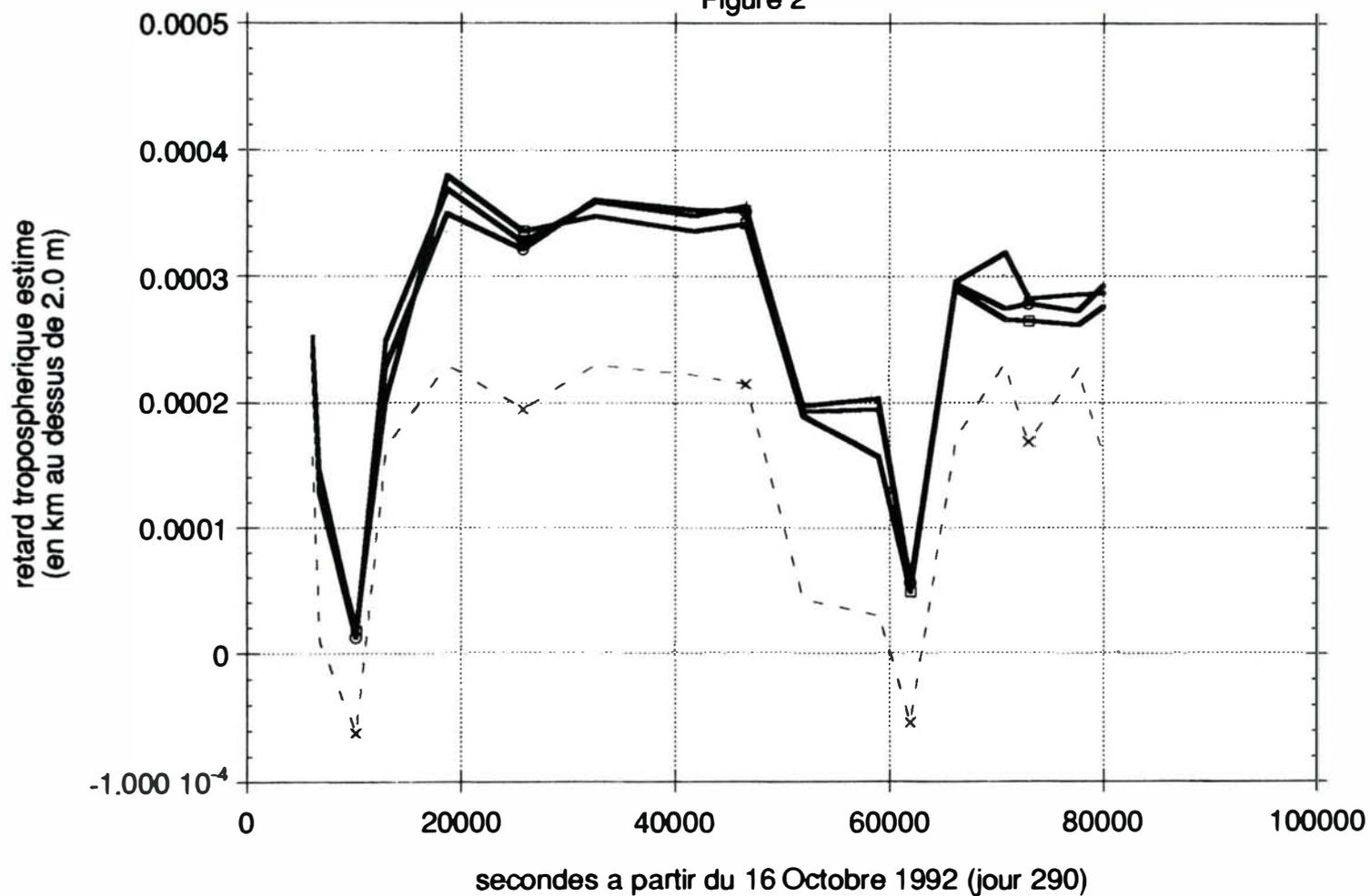
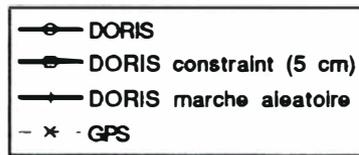
### 5.1.3.3 Prolongements envisagés

Concernant le logiciel de comparaison/combinaison de positions de satellite, le contexte extérieur a évolué rapidement, car en parallèle, un logiciel assez similaire a été développé au JPL (R. MALLA). Une étude sera donc à entreprendre pour décider s'il convient de redévelopper effectivement un nouveau logiciel ou de s'appuyer seulement sur le logiciel déjà existant dans une première version au JPL, pour le modifier afin de pouvoir atteindre les objectifs fixés.



stations: Fairbanks, Goldstone, Hartbeestock,  
Kokee Park, Metsahovi, New Alesund, Yaragadee,

estimation du retard troposphérique  
par le système DORIS  
Figure 2



La campagne d'observations de terrain est actuellement organisée par le SGN (M. LE PAPE) et tout porte à croire qu'elle pourra effectivement avoir lieu en 1993.

L'année prochaine, un jeu homogène de stations terrestres (Laser, GPS, DORIS, marégraphes) doit être calculé (positions et vitesses) dans le système de l'IERS. Une étude doit être conduite pour comparer les différents systèmes de référence terrestres sous-jacents. Les résultats devraient permettre aux groupes de calculs d'orbites et aux océanographes de corriger les orbites opérationnelles déjà diffusées des systématismes éventuels dûs à l'utilisation de plusieurs systèmes de référence terrestres. Dans ce cadre, des solutions précises de localisation DORIS seront nécessaires tant avec des données récentes sur Topex qu'avec des données plus anciennes sur SPOT-2.

De plus, afin de calculer une meilleure orbite pour Topex, un calcul simultané GPS et DORIS sera entrepris.

#### 5.1.3.4 Références

[CADOT 92] F. Cadot : *Combinaisons de systèmes de référence terrestres à partir de données d'orbites de satellites : Application au projet Franco-Américain Topex/Poseïdon*, mémoire de DEA de l'Observatoire de Paris - juillet 1992.

[MELBOURNE et al] W.G. Melbourne, W. Bertiger, E. Davis, S.M. Lichten, R.J. Muellerschoen, T.M. Munson, S.C. Wu, T.P. Yunck, B.G. Williams, B.D. Tapley, B.E. Schutz, P. Abusali, H.J. Rim & P. Willis : *First results from the GPS Flight Experiment on Topex/Poseïdon*, présenté à l'AGU Fall Meeting, San Francisco (USA) - décembre 1992.

[WILLIS et al] P. Willis, C. Boucher & F. Cadot : *Etude des systèmes de référence liés au projet Topex/Poseïdon*, présenté à la Journée Systèmes de Référence Spatio-Temporels de l'Observatoire de Paris, Paris - juin 1992.

[WILLIS, BOUCHER] P. Willis & C. Boucher : *Analyse d'un logiciel de combinaisons de jeux de coordonnées tridimensionnelles de points géodésiques et de positions de satellite : Applications à la mission Topex/Poseïdon*, IGN DT, IT/G à paraître - 1992.

## 5.2 GÉODÉSIE PHYSIQUE ET NIVELLEMENT

### 5.2.1 Détermination du géoïde

par Henri DUQUENNE

#### 5.2.1.1 Contexte / Objectifs

Cette action de recherche a pour but d'étudier et de développer des méthodes de détermination du géoïde. La référence [TORGE W., 1989], chapitre 4, décrit l'intérêt de l'étude du champ de gravitation et du champ de pesanteur en physique, en géodésie, en géophysique et en ingénierie. Plus particulièrement, et en dehors des applications classiques de la gravimétrie à la géophysique, la connaissance du champ est importante dans les domaines suivants :

- **en positionnement géodésique classique**, la majorité des observables sont affectées par le champ de pesanteur (voir par exemple [HEISKANEN W.A., MORITZ H., 1967], pages 217 à 224 et [HEIN W., 1982a]),

- **concernant les techniques spatiales**, le champ de gravitation affecte les trajectoires de satellites artificiels ([KOVLEVSKY J., 1988], pp. 89-104),

- **en nivellement**, la définition des systèmes d'altitudes est indissociable de la notion de potentiel de pesanteur ([HEISKANEN W.A., MORITZ H., 1967], chapitre 4). Le nivellement par techniques spatiales de positionnement nécessite une connaissance fine des surfaces de référence verticales, elles-mêmes bien approximées par le géoïde,

- **certains problèmes de changement de systèmes de référence** et de coordonnées géodésiques requièrent également une bonne connaissance du géoïde,

- **la navigation et l'arpentage inertiels** sont sensibles à la pesanteur ([TORGE W., 1989], page 126),

- **en océanographie**, l'écart entre le géoïde et la surface des océans (topographie de la surface océanique) est analysée grâce à la marégraphie et à l'altimétrie par satellite. Les applications principales sont l'étude de la marée, de la circulation océanique, des variations à long terme du niveau de la mer ([TORGE W., 1989], page 113).

Plusieurs méthodes de détermination du champ sont connues et actuellement employées, seules ou en association :

- l'exploitation de mesures sur satellites artificiels (mesures optiques, télémétrie laser, mesures Doppler, poursuite satellite-satellite, voir [REIGBER C., 1988]) : utilisée seule, cette méthode est susceptible de fournir des modèles globaux de géoïdes ayant une résolution de 550 km et une précision métrique,

- l'altimétrie par satellite, plus précise mais ne donnant que des géoïdes marins,

- l'exploitation des mesures de pesanteur : cette méthode consiste à intégrer les anomalies de pesanteur grâce à la formule de STOKES (voir par exemple [HEISKANEN WA., MORITZ H., 1967], pages 92 et suivantes et chapitre 8). En utilisant des données gravimétriques denses et de bonne qualité et des données complémentaires (approximation du champ sous la forme d'un développement tronqué du potentiel en harmoniques sphériques, Modèles Numériques de Terrain) on peut espérer, au prix d'un gros effort de calcul, obtenir des géoïdes régionaux d'une précision de un à quelques décimètres et d'une résolution de quelques kilomètres. Un processus complet de calcul est décrit dans [BALMINO G., 1992],

- la combinaison des trois types de mesures ci-dessus a permis d'obtenir des modèles globaux de champ avec des résolutions de 50 km [RAPP RH., 1988],

- le couplage du nivellement et de techniques spatiales, peu utilisé avant l'apparition du système GPS, devrait se développer rapidement et fait l'objet d'une autre action de recherche,

- la géodésie intégrée: imaginée initialement par KRARUP [EEG J., KRARUP T., 1973], elle consiste à compenser par collocation des mesures géodésiques ou gravimétriques, en introduisant aux stations géodésiques, en plus des inconnues de position, des paramètres de champ.

Pour mémoire, on peut citer :

- le nivellement astrogéodésique, utilisé en particulier entre 1973 et 1979 pour calculer des géoïdes français et européen par G. LEVALLOIS et G. BOMFORD, considéré maintenant comme une méthode désuète,

- la gradiométrie qui n'a pas encore donné lieu à applications.

Deux projets importants de détermination de géoïdes gravimétriques précis concernent l'Europe d'une part et la France d'autre part : celui de la sous-commission de l'Association Internationale de Géodésie pour le géoïde en Europe qui a débuté en 1990, celui du Bureau Gravimétrique International dont on trouve une analyse dans [BALMINO G., 1992]. L'IGN a participé à ces projets en réalisant un modèle numérique de terrain couvrant la France [DUQUENNE H., 1992]. Ces projets ne devraient cependant pas aboutir avant un petit nombre d'années. Par ailleurs, l'IGN a été sollicité pour des calculs de géoïdes locaux précis. On peut donc fixer les objectifs de recherche suivants :

- contribuer aux réalisations des projets européens et français en fournissant les données complémentaires (par exemple des données de contrôle issues de points spatiaux nivelés) et des géoïdes locaux servant d'éléments de comparaison et de validation,

- poursuivre l'étude déjà entreprise des méthodes de calcul de géoïdes locaux.

### 5.2.1.2 Activités - Résultats

En 1992, la version d'exploitation 2.5 du logiciel OPERA, acquise auprès de la société Terra-Sat, a été implantée sur le VAX 3400 du LAREG. Il s'agit d'un logiciel de traitement de géodésie intégrée développé par l'Université de la Bundeswehr de Munich (D), [LANDAU H., 1988], capable de compenser des observations ou pseudo-observations de géodésie (voir tableau 1) et de déterminer, simultanément, des paramètres du champ de pesanteur (hauteur du géoïde, composantes de la déviation de la verticale etc...) aux points du réseau géodésique, en d'autres points ou sous forme de grilles.

Acronyme	Type d'observation
DW	Différence de potentiel
PHI	Latitude astronomique
LAM	Longitude astronomique
GRV	Pesanteur absolue
DG	Différence de pesanteur
ZD	Distance zénithale
AZI	Azimut
DIR	Direction horizontale
DIS	Distance (non réduite)
PHE	Latitude ellipsoïdale
LAE	Longitude ellipsoïdale
HTE	Hauteur ellipsoïdale
HTO	Altitude orthométrique
HTG	Hauteur du géoïde
GPS	Base GPS
GP2	GPS multistation

Tableau 1 : observations acceptées par OPERA

Le principe du calcul est le suivant [LANDAU H., 1988]. Toutes les observables, à l'exception des distances (DIR, DIS), des coordonnées ellipsoïdales (PHE, LAE, HTE) et des bases GPS (GPS, GPS 2) sont plus ou moins fortement influencées par le champ de pesanteur. Pour chaque point du réseau géodésique, on introduit donc, en plus des inconnues de position, des paramètres de champ. Ces paramètres sont les valeurs au point considéré du potentiel perturbateur (écart entre le potentiel réel et un potentiel modèle) et de ses premières dérivées. Les relations d'observation, après linéarisation, se mettent donc sous la forme :

$$I - I_0 = A \delta x + R t + v$$

dans laquelle  $I$  est la matrice des observations,  $I_0$  celle des observations modélisées,  $\delta x$  celle des inconnues de position,  $t$  celle des inconnues de champ,  $v$  celle des résidus.  $A$  et  $R$  sont des matrices dépendant du réseau. La solution est obtenue en minimisant la norme mixte [MORITZ H., 1980] :

$$v^T C^{-1} v + t^T K^{-1} t$$

où  $C$  et  $K$  sont, respectivement, les matrices de covariance des mesures et des paramètres de champ. Cette dernière est déduite de l'analyse des données gravimétriques [HEISKANEN WA., MORITZ H. 1967]. Contrairement aux méthodes de détermination locale du géoïde utilisant l'intégrale de STOKES, la géodésie intégrée utilise des données géodésiques en plus des données gravimétriques. Ceci est un avantage pour l'IGN, qui maîtrise beaucoup mieux les premières que les secondes.

Des données auxiliaires permettent d'améliorer les résultats : gravimétrie, modèle numérique de terrain, modèle de potentiel. A titre de premier essai, un calcul de géoïde en Guadeloupe a été tenté [BAZZANA JM., 1992]. Les données comprenaient :

- des coordonnées de 60 points géodésiques issues de la mission GPS de 1990,
- des altitudes de ces mêmes points, déterminées par nivellement de précision ou par nivellement trigonométrique,
- des valeurs d'anomalies de pesanteur mises à disposition par le Bureau Gravimétrique International,
- un modèle de potentiel (OSU89),
- un modèle numérique de terrain au pas de 30" x 30" réalisé au LAREG à partir de la carte au 1 : 25 000.

Les résultats actuellement obtenus ne sont pas satisfaisants pour des raisons diverses :

- *La qualité et la répartition des données gravimétriques*

Les valeurs de pesanteur à terre ont été déterminées pour la plupart par l'Institut de Physique du Globe de Paris et sont d'excellente qualité. Elle sont malheureusement concentrées autour du volcan de la Soufrière, tandis que la Grande-Ile est mal pourvue. La précision de la gravimétrie marine est nécessairement plus faible et bien moins homogène. Sa répartition est très irrégulière.

- *La qualité et la répartition des données géodésiques*

Si aucun problème n'a été détecté concernant les coordonnées des points géodésiques, il faut noter qu'il n'y a pas de points dans la région du volcan. D'autre part, on a pu constater l'existence de discontinuités de l'ordre de 0,50 m du géoïde calculé sur certaines îles. Ce phénomène est dû au fait que ces îles ont une référence altimétrique indépendante de celle de la Grande-Ile et de Basse-Terre.

- *La nature du terrain*

La compensation par collocation suppose une bonne connaissance des propriétés statistiques des paramètres de champ qu'on veut déterminer. On y parvient en adaptant un modèle de fonction de covariance à la zone de travail, en utilisant les anomalies de pesanteur observées. Le modèle de fonction utilisé ne laisse dépendre la covariance que de la distance des points : c'est faire implicitement une hypothèse d'isotropie du champ qui n'est vraisemblablement pas vérifiée en Guadeloupe.

- *Les défauts du logiciel*

Certaines imperfections du logiciel sont apparues lorsqu'on a voulu utiliser un modèle numérique de terrain pour réduire les valeurs de pesanteur au géoïde. Le MNT comporte un très grand nombre de points en mer d'altitude nulle, que le logiciel considère comme des points non cotés. De plus, il n'est pas prévu de traitement particulier pour la réduction des données gravimétriques en mer ou en bord de mer. Dans son état actuel, OPERA n'est donc pas approprié à la détermination du champ en zone maritime, si on souhaite utiliser un MNT.

Parallèlement aux essais de OPERA, des programmes utilitaires ont été écrits pour formater les données gravimétriques ou faciliter l'utilisation de MNT de grande taille [BAZZANA JM., 1992]. Certains ne sont pas achevés.

### 5.2.1.3 Prolongements envisagés

Pour 1993, il est prévu de poursuivre les essais de détermination de géoïdes en région parisienne et dans la vallée de la Durance, par collocation (OPERA). Ces tests permettront d'évaluer les possibilités de la méthode et du logiciel dans des régions moins difficiles que la Guadeloupe. Il est convenu de comparer les résultats à ceux obtenus au BGI par la méthode de STOKES améliorée [BALMINO, 1992], si ceux-ci sont disponibles.

Il se confirmera sans doute que l'emploi de la collocation n'est pas universel, et il conviendra de compléter l'analyse des méthodes de détermination locales de géoïde et l'inventaire des logiciels existants, en précisant les domaines d'application et l'utilité de leur développement à l'IGN ou de leur acquisition. Pour répondre aux besoins les plus urgents et mieux orienter les recherches, il faudra établir un inventaire des modèles de géoïdes disponibles à l'IGN et dans d'autres organismes, et préciser leur intérêt pour l'IGN et pour d'autres utilisateurs.

### 5.2.1.4 Références

- [BALMINO et al 92] G. Balma, G. Balmino, M. Sarrailh & D. Toustou : *Géoïde français : état d'avancement et programme de travail au GRGS/BGI* - Bureau Gravimétrique International, Toulouse (F) - 1992.
- [BAZZANA 92] JM. Bazzana : Rapport de stage : *participation à l'installation d'un logiciel de calcul utilisant les méthodes de la géodésie intégrée*, Service de la Recherche, Laboratoire LAREG, IGN - 1992.
- [DENKER et al 86] H. Denker, W. Torge & HG. Wenzel : *Strategies and requirements for a new european geoid determination*, in Proceedings of the International Symposium on the definition of the geoid, Florence (I), 26-30 mai 1986, vol 1, pp. 207-222, Istituto Geografico Militare Italiano, Firenze (I) - 1986.
- [DUQUENNE 91] H. Duquenne : *OPERA : notice d'utilisation*, version 1, Institut Géographique National (F) - 1991.
- [DUQUENNE 92] H. Duquenne : *The new digital terrain model of France* - Presented at the 1st Continental Workshop on the geoid in Europe, Prague (CS), May 11-14 1992. Institut Géographique National, Paris (F) - mai 1992.

- [EEG, KRARUP 73] Eeg & Krarup : *Integrated geodesy* - The Danish Geodetic Institute, International report n° 7, Copenhagen (DK) - 1973.
- [HEIN 82a] W. Hein : *A contribution to 3D-operational geodesy. Part 1 : Principle and observational equations of terrestrial type*, in Proceedings of the International Symposium on Geodetic Networks and computations, IAG, Munich (D), 31-08 to 05-07-1981, Munich, Rudolf Sigi ed. - 1982.
- [HEIN 82b] W. Hein : *A contribution to 3D-operational geodesy - Part 2 : Concepts of Solution*, in Proceedings of the International Symposium on Geodetic Networks and computations, IAG, Munich (D), 31-08 to 05-07-1981, Munich, Rudolf Sigi ed. - 1982.
- [HEIN 86] W. Hein : *The role of GPS data in gravity field approximation*, in Proceedings of the International Symposium on the definition of the geoid (Florence, Italy, 26-30 mai 1986), vol 2, pp. 393-411, Istituto Geografico Militare Italiano, Firenze (I) - 1986.
- [HEIN et al 88] W. Hein, A. Leick & S. Lambert : *Integrated processing of GPS and gravity data*, in Publications 1988 of the Institute of Astronomical and Physical Geodesy, Munich (D), University FAF - 1988.
- [HEISKANEN, MORITZ 67] WA. Heiskanen & H. Moritz : *Physical Geodesy* - Graz, (A), Institute of Physical Geodesy, Technical University, 1967 - reprint 1979.
- [KOVALEVSKY 88] J. Kavalevsky : *Lectures in celestial mechanics*, in Theory of satellite geodesy and gravity field determination, Springer verlag, Berlin (D) - 1989.
- [LANDAU 88] H. Landau, K. Hehl, B. Eissfeller & GW. Hein : *OPERA 2.4 user's guide*, in : Operational geodesy software packages, Schriftenreihe, Heft 34, München (D), Universität der Bundeswehr - 1988.
- [MORITZ 80] H. Moritz : *Advanced Physical Geodesy* - Turnbridge Wells, Kent (GB), Abacus Press ed. - 1980.

## 5.2.2 Spécifications du réseau scientifique de nivellement français

par Henri DUQUENNE

### 5.2.2.1 Contexte / Objectifs

Cette action de recherche comporte deux phases distinctes :

\* - **La rénovation des spécifications de 1972 pour le réseau actuel**

Les opérations de nivellement en France métropolitaine comportent, à parts égales, des campagnes d'entretien et de densification. Il ne s'agit donc pas de rediscuter les objectifs ou les procédures employés, mais de rassembler les spécifications produits et processus en vigueur, et actuellement décrits dans des documents incomplets et disparates.

- **L'élaboration des spécifications techniques du futur réseau scientifique de nivellement français**

Le réseau français actuel de nivellement de précision (IGN69) est l'un des plus anciens en Europe. Les observations de premier ordre datent de 1962 à 1969. Les références [LEVALLOIS JJ., 1970], [DUQUENNE H., 1989] et [SGN, 1989] décrivent ce réseau, dont les spécifications sommaires figurent dans [IGN, 1972]. A titre de comparaison, le réseau fondamental allemand, pour la partie occidentale de ce pays, a été redéterminé entre 1980 et 1985. Le réseau français n'a donc pas bénéficié des améliorations apportées depuis 1970 aux instruments, ni aux méthodes d'observation et de traitement. Le Schéma Directeur de la géodésie [SGN 1989] prévoit, dans son paragraphe 3.2.3.4, la mise à l'étude d'un nouveau réseau qui compléterait, sans le remplacer, le réseau actuel. Ce réseau serait peu dense (7000 km couvrant l'ensemble du territoire), mais sa précision et son exactitude en feraient un outil scientifique de choix devant permettre le calcul d'une version plus exacte du réseau IGN69, une meilleure contribution française au réseau européen (UELN) et des études scientifiques diverses, en particulier dans le domaine de la géodynamique et de l'océanographie. Pour cette partie de l'action de recherche, il est prévu (et entrepris) une étude bibliographique, l'implantation d'une boucle d'essais et la rédaction de spécifications produits et procédures. La boucle d'essais doit offrir la possibilité d'étudier les sources d'erreurs encore controversées dans la littérature ou mal maîtrisées par l'IGN, de tester le réalisme des spécifications "produit", de valider les spécifications "processus", de former les équipes de nivellement et de contrôler périodiquement leur efficacité (respect des spécifications, maîtrise des rendements et des coûts).

## 5.2.2.2 Activité - Résultats

### Spécifications du réseau actuel

L'étude bibliographique et technique débutée en 1990-1991 a été achevée. Un projet de rédaction de spécifications "produit" a été élaboré. La rédaction définitive des spécifications a été confiée au SGN, maître d'ouvrage du réseau. Ce service a écrit une première version du document [SGN STG 2] qui est en cours de validation. Concernant les spécifications processus, le document [BONNETAIN P., 1987] a été jugé suffisant.

### Spécifications du futur réseau

#### Analyse bibliographique

- La bibliographie étudiée comporte de nombreux articles sur les techniques d'observation et les erreurs systématiques, ainsi que la recherche de fautes et l'évaluation de la précision. Des analyses globales telles que [WEBER D., 1986], il ressort que les sources d'erreurs systématiques actuellement mal maîtrisées sont les mouvements verticaux durant les observations des appareils et surtout des mires, la partie résiduelle (non symétrique) de la réfraction, l'instabilité des supports des repères de nivellement. Le problème le plus controversé est l'aptitude des modèles de réfraction à éliminer les erreurs résiduelles (voir [KAKKUKI J., 1983], [REMMER O., 1983], [DAVISON M., 1986]). La dernière de ces références tend à démontrer que l'application des modèles de réfraction améliore les fermetures de cheminements, mais non la dispersion des altitudes obtenues par répétition des mesures dans des conditions météorologiques variées. Cette question devra faire l'objet d'une étude particulière sur la boucle d'essais. L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence d'autres points sur lesquels les spécifications du réseau scientifique pourraient différer des spécifications du réseau actuel :

- introduction des niveaux à lecture automatique [INGESAND H., 1990],
- mode et fréquence d'étalonnage des mires : l'étalonnage en position verticale au moyen de comparateurs interférométriques automatisés est recommandé par de nombreux auteurs [GOTTWALD R., 1983], [MAUER W., 1983], [MAUER W., 1986]. Une étude économique devra déterminer s'il convient de mettre au point ou d'acquérir le banc d'étalonnage nécessaire, ou s'il est préférable de recourir à la sous-traitance,
- surveillance de la température des mires [ZIPPELT K., 1983],
- choix des chemins suivis, des stations d'appareil et de mires : [WEBER D., 1986] estime que l'adoption du nivellement motorisé aurait conduit à des améliorations de précision plus spectaculaires s'il n'avait pas obligé les équipes de nivellement à suivre les routes goudronnées,
- détermination des caractéristiques magnétiques des niveaux automatiques [HOLDAHL SR., 1986],
- choix de l'implantation des repères en vue de leur stabilité,
- introduction de covariances dans les compensations [LUCHE H., 1983].

Plusieurs auteurs proposent des méthodes globales de détection des fautes d'observation qui pourraient compléter les méthodes de fermeture de boucles ou de traverses actuellement employées au SGN [FUCHS H., 1983], [KOK JJ., 1983]. Toutefois, le réseau scientifique devant incorporer un grand nombre de repères anciens, le problème de la détection de fautes sera simplifié.

Les estimateurs de précision actuellement utilisés en France doivent également être complétés ou remplacés [REMMER O., 1984], [WEBER D., 1986], et l'analyse des données de nivellement introduite [GRAFFAREND EW., 1983], [VANICEK P., 1983].

#### Etude préalable de la boucle d'essais

En 1991, une étude sur cartes a été menée pour trouver en région parisienne un emplacement favorable à l'implantation de la boucle d'essai. Six sites, dont certains avec variantes, étaient en concurrence. En 1992, une reconnaissance sur le terrain a permis de limiter encore les choix possibles. Une étude économique a été réalisée. Au total, les critères de sélections retenus sont :

- l'éloignement et la longueur de la boucle (aussi faibles que possible, pour diminuer les coûts d'observations),
- la dénivelée, qui doit être la plus grande possible,
- le profil, devant comporter des parties plates et des parties pentues,
- les orientations des plus fortes pentes, qui doivent être variées,
- la présence de lignes électriques à haute tension, dont il est souhaitable d'étudier l'influence sur les niveaux.

### 5.2.2.3 Prolongements envisagés

Concernant le réseau IGN69, les spécifications produit devront être validées et publiées en 1993. Pour le réseau scientifique, le choix définitif du site de la boucle d'essais sera arrêté, elle devra être implantée et mesurée une première fois. L'ossature des spécifications sera définie.

### 5.2.2.4 Références

- [AUGATH 83] W. Augath : *On the application of criteria of reliability in levelling networks*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [BECKERS 90] H. Beckers : *Investigations of error influences in precise levelling on the test loop Koblenz*, Workshop on precise vertical positioning, Hannover (D) - octobre 1990.
- [BONNETAIN 87] P. Bonnetain : *Instruction à l'usage des techniciens du département de nivellement.*, IGN, Saint-Mandé (F) - mars 1987.
- [BOUCHER 88] C. Boucher : *Analyse d'un logiciel de transformation, comparaison et combinaison de jeux de coordonnées*, IT/G 57, arch. 27489 - IGN/SGN, Saint-Mandé (F) - 1988.
- [BOUCHER et al 90] C. Boucher, H. Duquenne & M. Jeannot : *French activity report to the UELN subcommission*, pres. at the Workshop on precise vertical positioning, Hannover (D), october 1990, CC/G n° 547, arch. 27594, IGN/SGN, Saint-Mandé (F) - 1990.
- [DAVISON, DOBSON 86] M. Davidson & AH. Dodson : *Atmospheric refraction and geodetic levelling : results on the Matlock test network.*, in *Determination of heights and height changes*, contrib. to Symp. on height determination and recent vertical crustal movements in Western Europe, Hannover (D), Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1986.
- [DUQUENNE, JEANNOT 89] H. Duquenne & M. Jeannot : *Le réseau français de nivellement de précision*, NT/G n° 59, arch. 27522, IGN/SGN - 1989.
- [FGCC 84] FGCC : *Standards and specifications for geodetic control network*, Federal Geodetic Control Committee, Rockville, Maryland (USA) - septembre 1984.
- [FUCHS 83] Fuchs : *Ajustement and gross error detection of levelling networks*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [GOTTWALD, WITTE 83] R. Gottwald & B. Witte : *A microcomputer-controlled comparator for visual and photoelectric calibration of levelling rods*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [GRAFAREND 83] EW. Gragarend : *An analysis of levelling data by the n-way classification model with interactions*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [HOLDAHL et al 86] JSR. Holdahl, WE. Strange & RJ. Harris : *Empirical calibration of Zeiss Ni-1 level instruments to account for magnetic errors*, in *Determination of heights and height changes*, contrib. to Symp. on height determination and recent vertical crustal movements in Western Europe, Hannover 1986, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1986.
- [IGN 72] IGN : *Spécifications de l'équipement géographique de base du territoire national*, IGN, Paris (F) - 1972.
- [INGENSAND 90] H. Ingensand : *The digital level Wild NA2000*, pres. at the Workshop on precise vertical positioning, Hannover (D) - 1990.
- [KAKKURI 83] J. Kakkuri : *About the future use of the Kukkamäki levelling refraction formula*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [KASSER 89] M. Kasser : *Un nivellement de très haute précision : la traversée Marseille-Dunkerque 1983*. C. R. à l'Académie des Sciences, t. 309, série II, pp. 695-700, Paris (F) - 1989.
- [KOK 83] J. Kok : *On internal and external reliability in levelling networks*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [LEVALLOIS 70] JJ. Levallois & J. Maillard : *Le nouveau réseau de nivellement de 1er ordre du territoire français*. Conséquences pratiques et scientifiques, IGN, Saint-Mandé (F) - 1970.
- [LUCHT 83] H. Lucht : *Neighbourhood correlations among observations in levelling networks*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [MAUER, SCHNADELBACH 83] W. Mauer & K. Schnadelbach : *First experiences with a vertical comparator for the calibration of invar rods*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [MAUER, ROSSMEIER 86] W. Bauer & F. Rossmeyer : *Calibration of invar rods, scale behaviour, influence on precise levelling*, in *Determination of heights and height changes*, contrib. to Symp. on height determination and recent vertical crustal movements in Western Europe, Hannover 1986, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1986.
- [NOAA 80] NOAA : *Tidal corrections to geodetic quantities* - NOAA Technical report NOS 83 NGS 14, Rockville, Maryland (USA) - february 1980.
- [NOAA 82] NOAA : *Corrections applied by the National Geodetic Survey to precise levelling observations*, NOAA Technical memorandum NOS NGS 34. Rockville, Maryland (USA) - 1982.
- [PELZER 83] H. Pelzer : *Systematic instrumental errors in precise levelling*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983. Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [REMMER 83] O. Remmer : *Refraction and others systematic effects in levelling*, in : *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.

- [REMMER 84] O. Remmer : *Error parameters for levelling networks* - Geodaetisk Institut, Meddelse n° 56, Kobenhavn (DK) - 1984.
- [SGN STG 2] SGN STG 2 : *Spécification du réseau national de nivellement de précision IGN69*, en préparation, IGN/SGN, Saint-Mandé (F).
- [SGN, 1989] SGN : *Schéma Directeur de la géodésie*, NT/G n° 60, GN/SGN, Saint-Mandé (F) - 6 nov. 1989.
- [TORGE 86] W. Torge : *Accuracy and stability of the height reference surface*, in *Determination of heights and height changes*, contrib. to Symp. on height determination and recent vertical crustal movements in Western Europe, Hannover 1986, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1986.
- [VANICEK, CRAYMER 83] P. Vanicek & M. Craymer : *Autocorrelation functions as a diagnostic tool in levelling*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.
- [WEBER, SCHELLEIN 86] D. Weber & H. Schellein : *The present situation of precise levelling*, in *Determination of heights and height changes*, contrib. to Symp. on height determination and recent vertical crustal movements in Western Europe, Hannover 1986, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1986.
- [ZIPPELT, 83] K. Zippelt : *Measurement of level rod's temperature and effects on precise levelling*, in *Precise levelling*, contrib. to Symp. on precise levelling, Hannover 1983, Dümmler Verlag, Bonn (D) - 1984.

## 5.3 MÉTHODES DE POSITIONNEMENT

### 5.3.1 Calcul de campagne GPS de haute précision pour des buts métrologiques de géodésie ou de géophysique

par Serge BOTTON, Loïc DANIEL et Pascal WILLIS

#### 5.3.1.1 Contexte / Objectifs

L'AIG (Association Internationale de Géodésie) a décidé en 1991 de créer un service, appelé IGS (International Geodynamics Service) qui, indépendamment des militaires américains doit fournir pour le GPS, des orbites précises, des paramètres de rotation de la Terre, des corrections d'horloges de satellites et des modèles d'ionosphère. Ce service accessible à tout utilisateur du GPS doit mettre à la disposition de la communauté civile l'ensemble de ces produits et l'ensemble des données des stations de poursuite. Ce service doit aussi avoir une bonne régularité et une bonne pérennité. Un appel à candidature pour la participation à ce projet a donc été lancé en 1991 par l'AIG. Différents secteurs d'activité étaient prévues : station d'observation (Core Station), centre de données et de précalcul régional, centre de données mondial et centre d'analyse. L'IGN a décidé de participer à ce projet en soumettant sa candidature sur deux projets. Le premier, devenir centre de données mondial, le second en participant à un centre d'analyse Européen appelé "Code". Cette collaboration entre l'IGN, l'IFAG (Institut de géodésie appliquée (D), L+T (Service de topographie (CH), SK (Institut cartographique de l'état (S) et l'AIUB (Institut d'Astronomie de l'Université de (CH) permet de disposer des moyens nécessaires pour assurer le bon fonctionnement d'un tel centre, en continu, pendant toute l'année. Ces deux propositions ont été acceptées par l'"Oversight Committee" de l'IGS qui supervise ce projet.

La mise en place de du centre de calculs a été faite début 1992 à l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne (CH) qui dispose d'un logiciel de traitement global de données GPS (le Bernese Software) et d'une longue expérience dans le calcul d'orbite.

L'AIG décida qu'en 1992 une campagne test, IGS'92 serait organisée, qu'elle durerait trois mois (21 juin - 23 septembre). Le but étant, pendant cette période, de vérifier en vraie grandeur l'opérationnalité du processus de production des produits de l'IGS (transmission automatique des données à l'aide du réseau Internet, automatisation des calculs...) et de permettre à l'ensemble des acteurs de donner la preuve de leur capacité à mener à bien leur travail propre. Pendant ce laps de temps, les centres de calcul, dont Berne, devaient calculer 24 heures sur 24 des orbites précises, pour l'ensemble des satellites, et des paramètres de rotation de la terre dans un délai de une à deux semaines à l'aide des données enregistrées par les "Core Stations" et mettre ces produits à la disposition des centres de données mondiaux ou ils sont à la disposition des utilisateurs. Une autre campagne, Epoch'92, a aussi été décidée; son objectif est de densifier le réseau de base de l'IGS et de fournir des coordonnées pour ces points stationnés avec une précision de quelques centimètres en absolu dans l'ITRF(IERS Terrestrial Reference Frame). Environ 200 stations ont été observées sur l'ensemble du globe entre le 27 juillet et le 13 août. Le SGN a pris part à cette campagne en observant une quinzaine de points situés sur des sites DORIS non en collocation Laser ou VLBI, le but étant de vérifier et d'améliorer la qualité des coordonnées des balises DORIS.

### 5.3.1.2 Activité - Résultats

Le centre de données IGS a été mis en place à l'IGN en juin 1992 dans des délais très courts par L. DANIEL, afin de participer à la campagne IGS'92. Ce centre doit assurer l'archivage et la redistribution des données observées par le réseau IGS et des produits (orbites précises, paramètres de rotation de la Terre) calculés dans les différents centres de traitements. Ce centre a contribué activement à développer un pôle européen de la structure IGS. D'autres centres de calculs européens s'inscrivent désormais dans le même type de relation avec l'IGN (GFZ : GeoForschungsZentrum Postdam, durant la campagne IGS'92 et l'ESOC : European Space Operations Center qui dépend de l'ESA : European Space Agency). L'activité du centre de données à l'IGN durant la campagne IGS'92 a permis aux centres de calculs de donner leur pleine mesure dans le niveau de précision atteint en routine et avec des délais courts sur les éphémérides des satellites GPS. L'existence d'un tel centre hors USA en Europe, est très appréciée par la communauté scientifique internationale. Il est à noter que la réussite de l'expérience IGS'92 a permis d'avancer la date de fonctionnement opérationnel de l'IGS. Ce service fonctionne en mode "pilote" depuis le 23/09/92 (c'est-à-dire la fin de la campagne IGS'92)

La participation française au centre de calculs de Berne, qui s'inscrit dans le cadre de cette action de recherche, a consisté en l'envoi pendant 5 mois d'un ingénieur qui a participé à l'élaboration des orbites précises et des paramètres de rotation de la terre de l'IGS, puis au calcul des stations IGN d'Epoch'92.

- Etude des coefficients de pression de radiation (P0 et P2) afin d'étudier leur évolution au cours du temps. Cette analyse montre que les valeurs trouvées sont en accord avec la théorie et explique pourquoi les satellites passant en éclipse longue (entre 45 et 55 minutes) ont des orbites systématiquement moins bonnes que les autres. En effet, après un passage en éclipse longue le satellite doit brusquement se repositionner pour remettre ses panneaux solaires perpendiculaires à la direction des rayons du soleil, tout en gardant ses antennes pointées vers le sol. Cette manoeuvre entraîne une accélération parasite non modélisée environ 10 fois supérieure à P2 (composante suivant les axes de rotation des panneaux solaires de l'ordre de  $10^{-11}$  m/s<sup>2</sup>) que l'on retrouve dans le calcul de P2. De même lors de manoeuvres volontaires de la part des américains et lorsqu'un satellite est déséquilibré par le mauvais fonctionnement de ses gyroscopes internes, les valeurs des pressions de radiation sont aberrantes (de 10 à 100 fois supérieures à la moyenne). Cette étude a donc permis de mieux connaître les perturbations occasionnelles pouvant affecter un satellite, de les prévoir, de connaître leur ordre de grandeur et de définir une stratégie de prise en compte de ces perturbations.

- Etude sur les paramètres de troposphère estimés. Lors du calcul, les météo prises sur le terrain ne sont pas utilisées. La correction troposphérique est calculée à l'aide d'un modèle dont les paramètres météo (température sèche, température humide, pression) sont fixés à des valeurs de référence au niveau de la mer. Mais pour tenir compte des différences locales de météo, des paramètres de corrections de troposphère sont estimés par station pour un laps de temps donné (lors du calcul automatique, quatre paramètres sont ainsi estimés). Le but de cette étude est double : essayer de voir s'il existe une corrélation entre les variations des paramètres estimés et celles des données météo terrain et optimiser le nombre de paramètres à estimer par station et par jour. L'étude menée n'a pas permis de trouver de corrélation, par contre il est apparu qu'un trop petit nombre de paramètres estimés (inférieur à 2) ou un trop grand nombre (supérieur à 12) n'est pas valable.

- Etude de test de la qualité des orbites. On a calculé plusieurs bases de 1500 km à 3000 km, indépendantes du réseau des "Core Stations" avec les éphémérides radiodiffusées et les éphémérides précises à Berne afin de connaître l'amélioration apportée. On constate en répétitivité que la précision passe de  $10^{-6}$  à  $10^{-8}$  (voir le tableau : Répétitivité pour la ligne de base Cachoeira -Santiago - 2748 km - en utilisant soit les orbites radio-diffusées, soit les orbites précises CODE).

- Calcul des données IGN de la campagne Epoch'92 (voir carte des stations IGN).

Les stations étant presque toutes réparties dans des régions de faible densité en "Core Stations", dans l'hémisphère sud (Afrique, Amérique du Sud) et en Asie, et les distances entre elles et les "Core Stations" étant souvent supérieures à 4000 km, on a mené un calcul global incluant les stations IGN (15) et les "Core Stations" (30) sur les huit jours de données disponibles. Le traitement a été réalisé à partir des éphémérides précises de l'IGS réajustées lors des calculs de la manière suivante :

Un traitement global avec réestimation d'orbites par jour pour l'ensemble des données (soient 35 et 40 stations) qui a permis d'éliminer les mauvaises mesures et de résoudre les différents problèmes rencontrés : mélange de récepteurs, RINEX Ashtech non conforme, données très bruitées, pas de code P pour 3 récepteurs, stations équatoriales avec forte activité ionosphérique perturbant les mesures. Puis, un traitement sur 2 jours avec réestimation des orbites et paramètres de rotation de la terre, un traitement sur 4 jours avec réestimation des orbites et paramètres de rotation de la terre, et enfin un calcul complet prenant en compte l'ensemble des 8 jours avec réestimation des orbites et des paramètres de rotation terrestre.

Les calculs intermédiaires de deux et quatre jours ont permis une étude de la répétitivité qui a montré que sur l'ensemble du réseau on obtient une précision meilleure que 0.01 ppm (voir tableaux 1 à 8 : répétitivité pour quatre stations, comparaison entre les quatre solutions de deux jours et comparaison entre les deux solutions de quatre jours).

La comparaison entre les coordonnées DORIS (solution combinée JCODT2) et la solution GPS est très bonne, et la différence entre les deux ne dépasse pas 10 cm (voir tableaux 9 à 22 : comparaison DORIS- GPS sur les sites de la campagne Epoch'92).

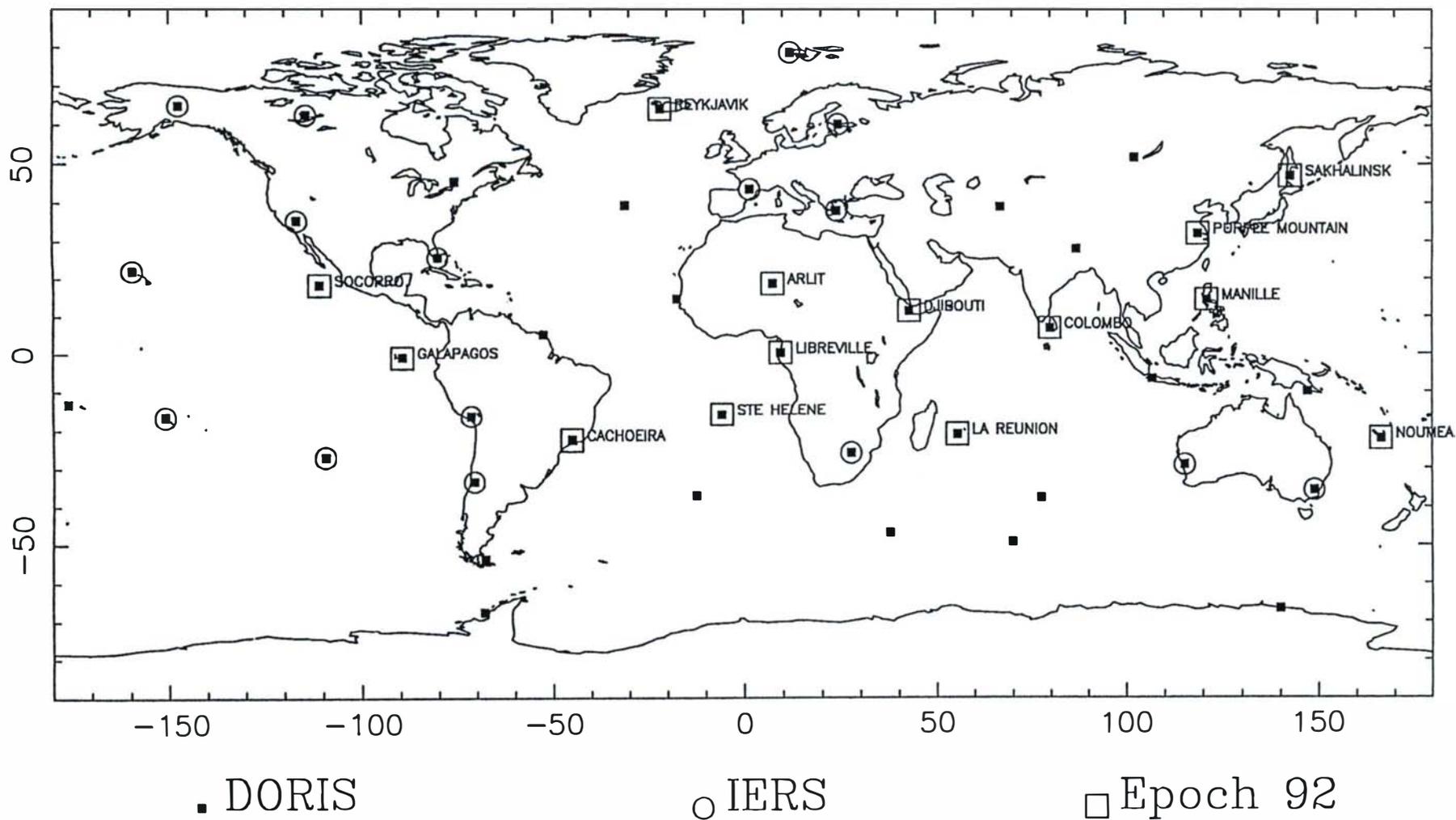
### 5.3.1.3 Prolongements envisagés

- Calcul du RRF, Réseau de Référence Français.
- Calcul de grandes campagnes internationales comme GIG'91.
- Calcul d'un réseau GPS global (IGS). Ce calcul permet la réalisation d'un système de référence mondial avec une précision comparable à celui obtenu à partir des données Laser et VLBI.
- Calcul de coordonnées pour les stations DORIS. En effet pour obtenir des orbites de très haute précision avec DORIS, il faut connaître les coordonnées des stations avec une très grande précision.
- Installation sous UNIX du logiciel développé au JPL : GIPSY. Ceci permettra de le comparer au "Bernese Software" aussi bien pour les modèles utilisés que pour les stratégies d'estimations, afin d'optimiser le calcul d'orbites précises.

### 5.3.1.4 Références

- [BEUTLER, BOTTON 92] G. Beutler & S. Botton : *Aspects techniques de la localisation précise par GPS*, présenté à la journée GPT/CNIG, à Paris le 3 septembre 1992.
- [BEUTLER, BOTTON 92] G. Beutler & S. Botton : *L'apport de l'International GPS Geodynamics Service (IGS) pour la géodésie et la cartographie*, présenté à la journée GPT/CNIG, Paris - le 3 septembre 1992.
- [DANIEL 92] L. Daniel : *Le centre de données global de l'IGN*, présenté à la journée GPT/CNIG, Paris (F) - le 3 septembre 1992.
- [GURTNER et al] W. Gurtner, W. Fankhauser, S. Ehrnsperger, W. Wende, W. Friedhoff, H. Habrich & S. Botton : *EUREF-89 GPS campaign - Results of the Processing by the "Berne Group*, publié dans le rapport numéro 1 de la Commission pour un réseau de référence européen (EUREF), Section 1 de l'Association Internationale de Géodésie.
- [NOLL et al 92] CE. Noll, Y. Bock & L. Daniel : *IGS network data center report, Dynamics of the Solid Earth*, Investigators Working Group Meeting, NASA/ GSFC - 15 octobre 1992.
- [ROTHACHER et al 92] M. Rotacher, G. Beutler, E. Brockmann, S. Kankhauser, W Gurtner, T. Springer, S. Botton, L. Mervart, A. Wiget & U. Wild : *Processing at the "Center for Orbit Determination in Europe" (Code) during the IGS 1992 campaign*, présenté à la session IGS de Greenbelt - 15 octobre 1992.

## Epoch'92 : Stations Françaises en colocation DORIS

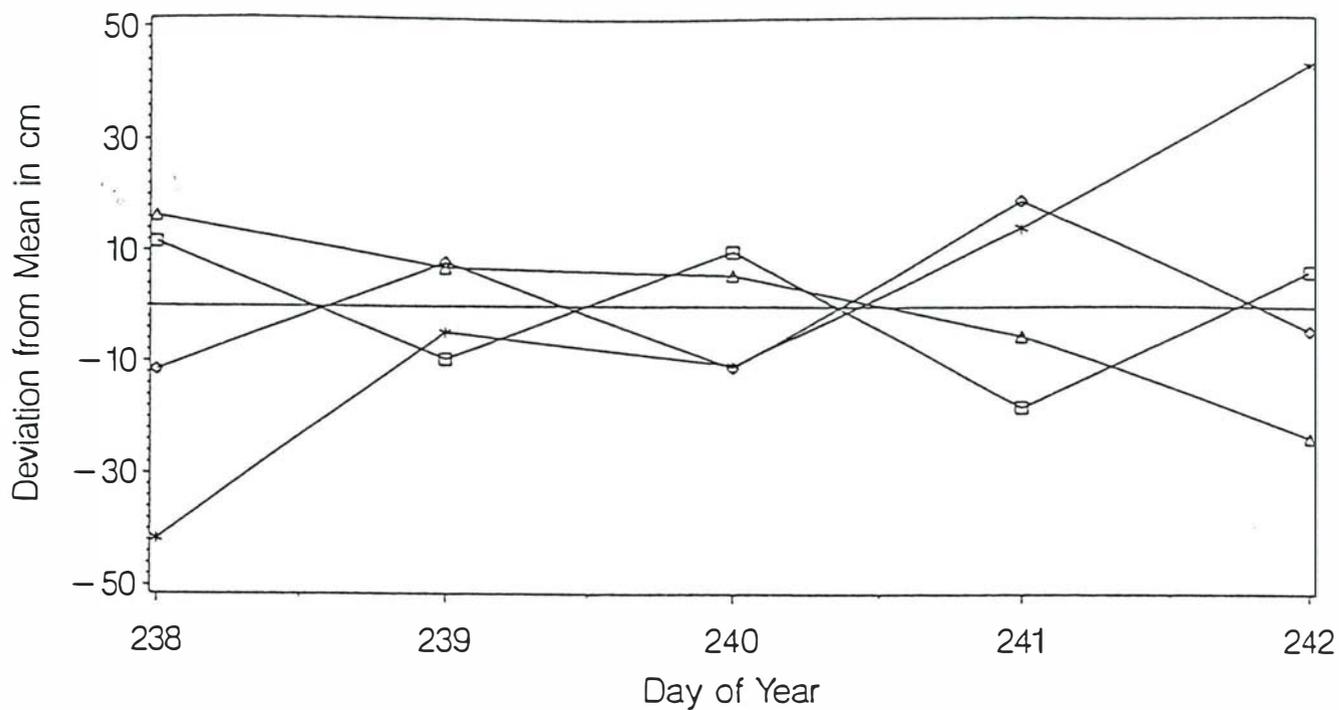


Stations francaises de la campagne Epoch'92

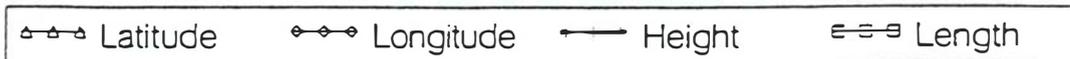
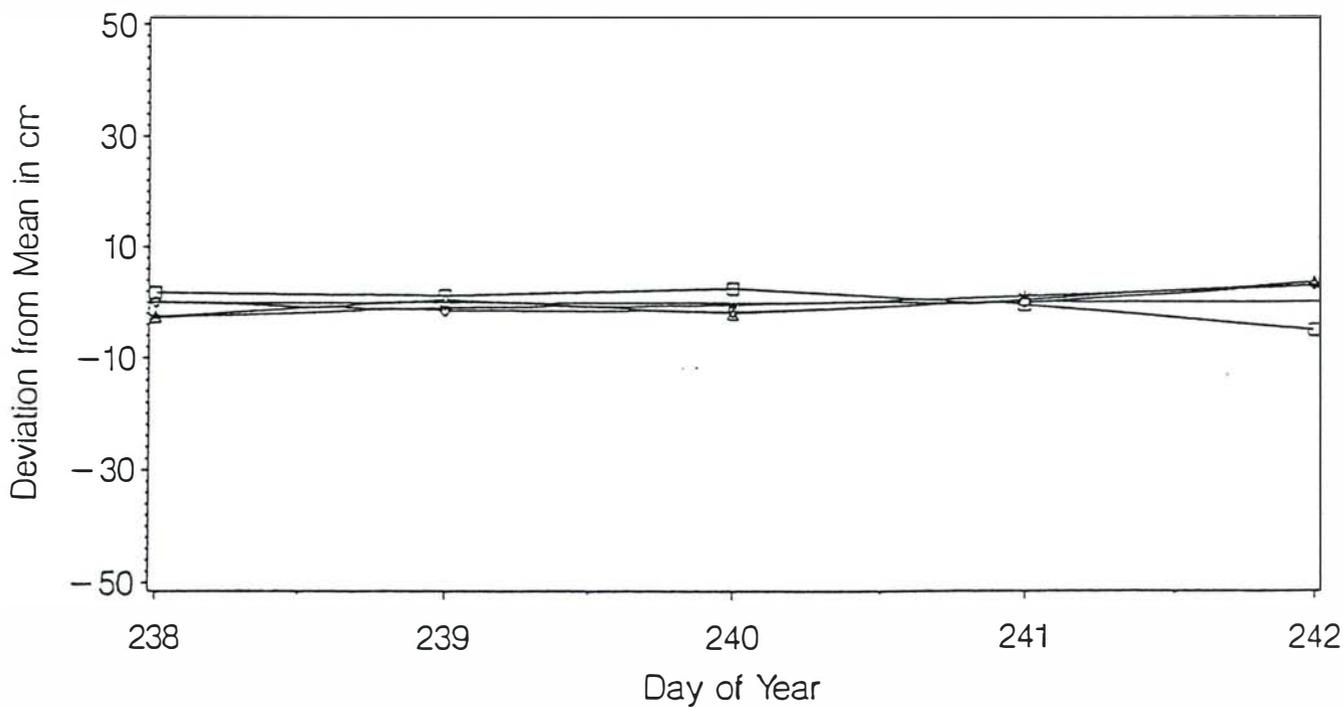
Répétitivité pour la ligne de base Santiago - Cachoeira (2748 km)

répétitivité journalière avec les orbites radiodiffusées

répétitivité journalière avec les orbites précises "Code"



répétitivité journalière avec les orbites précises "Code"



Répétitivité pour les solutions de 2 jours pour quatre stations.

Ecart par rapport à la moyenne des quatre solutions pour la longitude, la latitude et l'altitude, l'unité utilisée est le mètre :

<b>solution / jours</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>	<b>altitude</b>
sol. jours 210-211	- 0.001	0.006	- 0.041
sol. jours 212-213	- 0.011	0.005	- 0.010
sol. jours 217-218	0.003	- 0.010	0.043
sol. jours 219-220	0.009	- 0.001	0.008

**Tableau 1 : station Arlit**

<b>jours</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>	<b>altitude</b>
sol. jours 210-211	0.000	0.004	0.056
sol. jours 212-213	0.000	- 0.007	- 0.021
sol. jours 217-218	- 0.009	- 0.004	- 0.019
sol. jours 219-220	0.009	0.007	- 0.016

**Tableau 2 : station Socorro**

<b>jours</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>	<b>altitude</b>
sol. jours 210-211	0.001	0.003	0.006
sol. jours 212-213	- 0.003	- 0.005	0.016
sol. jours 217-218	0.002	0.002	- 0.022
sol. jours 219-220			

**Tableau 3 : station Arnagardur**

<b>jours</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>	<b>altitude</b>
sol. jours 210-211	- 0.042	0.066	- 0.088
sol. jours 212-213	- 0.007	- 0.019	0.013
sol. jours 217-218	0.030	- 0.069	0.045
sol. jours 219-220	0.020	0.022	0.029

**Tableau 4 : station Réunion**

Répétitivité pour les solutions de 4 jours pour quatre stations.

Ecart par rapport à la moyenne des deux solutions pour la longitude, la latitude et l'altitude, l'unité utilisée est le mètre :

<b>solution / jours</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>	<b>altitude</b>
sol. jours 210-213	- 0.004	0.006	- 0.024
sol. jours 217-220	0.004	- 0.006	0.024

**Tableau 5 : station Arlit**

<b>solution / jours</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>	<b>altitude</b>
sol. jours 210-213	0.002	0.000	0.027
sol. jours 217-220	- 0.002	0.000	- 0.027

**Tableau 6 : station Socorro**

<b>solution / jours</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>	<b>altitude</b>
sol. jours 210-213	- 0.004	0.001	0.016
sol. jours 217-220	0.004	- 0.001	- 0.016

**Tableau 7 : station Arnagardur**

<b>solution / jours</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>	<b>altitude</b>
sol. jours 210-213	- 0.025	0.011	- 0.035
sol. jours 217-220	0.025	- 0.011	0.035

**Tableau 8 : station Réunion**

## Comparaison GPS - DORIS sur les sites observés pendant Epoch 92

	Repère GPS (issu GPS)	GPS DORIS (2)	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	5991291,696	1340,497	5992632,193	5992632,148	0,045	<b>E : -0,110</b>
Y	773713,651	2178,606	775892,257	775892,362	-0,105	<b>N : 0,060</b>
Z	2040608,592	-4766,099	2035862,493	2035862,419	0,074	<b>h : 0,053</b>

**Tableau 9 : Arlit**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	2587441,661			2585528,349		<b>E : 0,</b>
Y	-1042831,245			-1044368,111		<b>N : 0,</b>
Z	5716573,556			5717158,969		<b>h : 0,</b>

**Tableau 10 : Arnagardur (Reykjavik), rattachement non encore disponible**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (1)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	4163489,719	4,282	4163494,001	4163493,769	0,232	<b>E : 0,069</b>
Y	-4163778,729	-3,403	-4163782,132	-4163781,998	-0,134	<b>N : 0,016</b>
Z	-2444568,427	6,668	-2444561,759	-2444561,668	-0,091	<b>h : 0,274</b>

**Tableau 11 : Cachoeira Paulista (Brésil)**

(1) : Coordonnées issues de la mise à jour du jeu JCODT2 (Université du Texas)

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	1113302,943	-24,132	1113278,811	1113278,807	0,004	<b>E : 0,003</b>
Y	6233645,377	0,940	6233646,317	6233646,278	0,039	<b>N : 0,082</b>
Z	760258,581	18,043	760276,624	760276,537	0,087	<b>h : 0,049</b>

**Tableau 12 : Colombo**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	4583088,597	30,913	4583119,510	4583119,485	0,025	<b>E : 0,007</b>
Y	4250979,148	-27,042	4250952,106	4250952,073	0,033	<b>N : 0,029</b>
Z	1266241,337	6,335	1266247,672	1266247,634	0,038	<b>h : 0,048</b>

**Tableau 13 : Djibouti**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	42734,702	-17,968	42716,734	42716,561	0,173	<b>E : 0,173</b>
Y	-6377213,677	-2,746	-6377216,423	-6377216,412	-0,011	<b>N : -0,154</b>
Z	-99580,964	-9,735	-99590,699	-99590,545	-0,154	<b>h : 0,015</b>

**Tableau 14 : Galapagos**

Remarque : les coordonnées DORIS résultent d'un calcul fait à partir d'un faible nombre de jours de données

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	6287385,970	2,751	6287388,721	6287388,587	0,134	<b>E : -0,042</b>
Y	1071574,362	-0,139	1071574,223	1071574,243	-0,020	<b>N : 0,026</b>
Z	39132,650	14,404	39147,054	39147,027	0,027	<b>h : 0,129</b>

**Tableau 15 : Libreville**

Remarque : coordonnées GPS issues d'un seul jour de mesures.

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	-3184192,516	-165,22	-3184357,736	-3184357,668	0,068	<b>E : 0,006</b>
Y	5291066,023	-23,73	5291042,293	5291042,168	0,125	<b>N : 0,031</b>
Z	1590599,274	-179,77	1590419,504	1590419,435	0,069	<b>h : 0,155</b>

**Tableau 16 : Manille**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	-5741764,339	1770,691	-5739993,648	-5739993,637	-0,011	<b>E : 0,012</b>
Y	1387402,796	145,698	1387548,494	1387548,504	-0,010	<b>N : -0,042</b>
Z	-2398273,069	-3812,434	-2402085,503	-2402085,454	-0,049	<b>h : 0,026</b>

**Tableau 17 : Nouméa**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	-2608776,539			-2608501,728		<b>E : 0,</b>
Y	4739825,822			4739980,569		<b>N : 0,</b>
Z	3366871,084			3366883,077		<b>h : 0,</b>

**Tableau 18 : Purple Mountain : en attente des résultats du rattachement**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	3364095,564			3364093,869		<b>E : 0,017</b>
Y	4907945,231			4907945,424		<b>N : 0,009</b>
Z	-2293468,621			-2293482,393		<b>h : 0,039</b>

**Tableau 19 : La Réunion : en attente des résultats du rattachement**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	Antenne DORIS (issu GPS)	Antenne DORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	-3465323,074	-2,961	-3465326,035	-3465325,942	-0,093	<b>E : 0,122</b>
Y	2638268,163	-1,421	2638266,742	2638266,825	-0,083	<b>N : -0,002</b>
Z	4644082,762	-0,318	4644082,444	4644082,422	0,022	<b>h : 0,032</b>

**Tableau 20 : Sakhalinsk**

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	AntenneDORIS (issu GPS)	AntenneDORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	-2160812,372	87,21	-2160725,162	-2160725,144	0,173	<b>E : 0,165</b>
Y	-5643009,902	-7,99	-5643017,892	-5643017,724	-0,011	<b>N : -0,129</b>
Z	2034731,199	105,48	2034836,679	2034836,607	-0,154	<b>h : -0,098</b>

Tableau 21 : Socorro : rattachement provisoire

	Repère GPS (issu GPS)	GPS -> DORIS	AntenneDORIS (issu GPS)	AntenneDORIS (JCOD4)	Ecart (m)	$\delta$ (E, N, h) (m)
X	6104823,876	4,512	6104828,388	6104828,315	0,073	<b>E : 0,057</b>
Y	-605862,963	25,460	-605837,503	-605837,553	0,050	<b>N : -0,052</b>
Z	-1740699,614	-6,996	-1740706,610	-1740706,537	-0,073	<b>h : 0,085</b>

Tableau 22 : Sainte Hélène

### 5.3.2 Réalisation d'un logiciel de traitement VLBI astrométrique et géodésique

Chercheurs associés et collaborations extérieures :

*C. Boucher, P. Willis, F. Duquenne, S. Branchu, M. Balcaen (IGN),  
G. Petit (Bureau International des Poids et Mesures),  
M. Feissel, D. Bourquard, NA. Essaifi, P. Charlot, AM. Gontier  
& E. Eisop (DANOF/Observatoire de Paris),  
JF. Lestrade (Observatoire de Meudon) .*

#### 5.3.2.1 Contexte / Objectifs

L'objectif de ce projet est de réaliser un logiciel d'analyse VLBI géodésique et astrométrique. La motivation principale de ce projet, dénommé Gloria, est de construire un modèle théorique incluant tous les effets qui ont une influence de 1 mm ou plus sur les observations VLBI, conformément aux objectifs scientifiques des programmes internationaux pour la fin de ce siècle. Sur le plan technique, un certain nombre d'innovations garantiront une meilleure exploitation des données VLBI. L'objectif est en effet de réaliser un logiciel capable de traiter d'importants volumes de données (éventuellement toutes les données disponibles) en s'appuyant sur une structure de base de données, et sur un SGBD. Il s'agit de réaliser un outil de traitement souple, interactif et convivial, mais aussi un laboratoire permettant d'expérimenter et de tester des modélisations et des méthodes de traitement, et enfin un instrument de gestion de toutes les données VLBI disponibles unifiées en un monde cohérent. Ces innovations constitueront un plus par rapport aux logiciels existant actuellement, dont la conception est déjà ancienne. Cet élargissement des compétences permettra d'être partie prenante dans les grands projets VLBI internationaux, soit au sol avec le VLBA et la possible antenne du CNES à Tahiti, soit dans l'espace avec les projets de VLBI spatial.

#### 5.3.2.2 Activité - Résultats

Etant donné la complexité et l'ampleur du projet, une étude de faisabilité et une étude spécifiant les conditions matérielles et humaines dans lesquelles ce projet pourra être mené à bien ont été effectuées. De plus, le DANOF ne disposant pas encore du matériel informatique nécessaire au développement du logiciel, et aucune certitude concernant la disponibilité de ce matériel n'existant à l'heure actuelle (plusieurs demandes de financement ont été effectuées auprès de l'INSU et du CNES), il a été jugé préférable de n'entamer aucun développement informatique à l'IGN avant que le DANOF ne soit assuré de disposer de l'outil informatique nécessaire (le refus de financement de celui-ci par l'INSU ou le CNES remettrait gravement en cause la poursuite du projet). Le travail effectué s'est donc concentré sur des activités de préparation du projet revêtant néanmoins un intérêt plus général.

Un programme scientifique a donc été constitué, et des thèmes particulièrement porteurs pour le projet Gloria ont été identifiés. Ces thèmes sont : la construction d'une modélisation cohérente des systèmes de référence au sens de la relativité générale, l'étude des effets de marée et de surcharge atmosphérique

affectant la position des stations VLBI, l'étude des variations à haute fréquence de la rotation de la Terre, l'analyse multi-technique de l'orientation de la Terre, la paramétrisation des effets produits par la structure des sources radio extragalactiques, et la densification du repère extragalactique de l'IERS.

Une étude des modalités matérielles de la réalisation du projet Gloria a par ailleurs été menée à bien : les outils matériels et logiciels ont été clairement identifiés, après une étude des besoins informatiques nécessaires au bon déroulement du projet. Le projet a été décomposé en une série d'activités bien définies, et une répartition des rôles et des responsabilités entre les divers partenaires pressentis a été proposée. Les conditions de développement et d'exploitation ont été par ailleurs définies. Toutes ces propositions se concrétisent par un projet de convention de collaboration entre tous les partenaires pressentis du projet Gloria (articles contenus dans cet accord : objet de l'accord, déroulement et modalités de la collaboration entre les parties, propriétés des différentes composantes du système Gloria, publications, diffusion du logiciel à la communauté internationale). Ces propositions font actuellement l'objet d'un examen approfondi de la part des partenaires.

Le résultat de ces études est consigné dans un rapport [PRIOU et al 92].

### 5.3.2.3 Prolongements envisagés

Le document [PRIOU et al 92] est actuellement en cours d'examen par les parties prenantes. Une réunion de validation finale aura prochainement lieu.

### 5.3.2.4. Références

[PETIT, 90] G. Petit : *Gloria version 1* - 1990.

[PRIOU, PETIT, 91] D. Priou & G. Petit : *GLObal Radio Interferometric Analysis, projet de logiciel de traitement des données VLBI et de gestion d'une base de données VLBI* - 1991.

[PRIOU et al, 92] D. Priou, P. Charlot, M. Feissel & N. Essaïfi : *GLObal Radio Interferometric Analysis, modalités du projet* - 1992.

## 5.3.3 Etude du couplage GPS/Inertiel

*par Denis BURTIN*

### 5.3.3.1 Contexte / Objectifs

L'utilisation du GPS statique a permis l'amélioration des techniques de production pour la détermination de réseaux locaux, nationaux et mondiaux. Toutefois la même amélioration n'a pas eu lieu pour les réseaux de détails. Le GPS utilisé en mode cinématique impose des contraintes importantes au niveau de la production et seules les méthodes "rapide statique" sont utilisées en production. Dans un même temps, on a assisté à un développement des systèmes inertiels dont la précision peut maintenant atteindre le décimètre. Toutefois cette précision ne peut être obtenue qu'en utilisant de nombreux points d'appui et avec des arrêts fréquents du véhicule. La mise en commun des possibilités de ces deux systèmes devrait permettre d'obtenir un nouvel instrument de positionnement. Le système inertiel devrait permettre le positionnement lorsque le signal GPS n'est pas accessible (passage derrière un masque). Il devrait aussi permettre de corriger les sauts de cycle lors de la récupération du signal GPS. Le GPS quant à lui devrait permettre d'éviter une dégradation importante de la précision du système inertiel. Cette recherche vise donc à intégrer ces deux systèmes (au niveau d'un logiciel de post-traitement) afin d'obtenir un système de positionnement continu permettant d'obtenir des précisions sub-décimétriques.

Cette recherche fait l'objet d'une thèse, financée par l'IGN, avec la collaboration de KMS (DK) et de LMV (S).

### 5.3.3.2 Activité - Résultats

Le travail de 1992 a principalement consisté en l'étude des différentes techniques nécessaires à la compréhension du problème et au choix d'une technique d'intégration ainsi qu'à la réalisation d'un programme permettant de traiter les données GPS lors de l'intégration.

## A - Le type d'intégration

Trois types de solutions étaient envisageables :

- Une "pseudo-intégration" où le système inertiel était utilisé en conjonction avec le système GPS : Le réseau à observer est dans un premier temps densifié au moyen du GPS (Statique, rapide statique...), puis on utilise le système inertiel entre ces points considérés comme connus afin de faire de la trajectographie ou de densifier de façon encore plus importante le réseau. Ce type de travail ne nécessite pas de recherches particulières car il utilise le GPS et le système inertiel de manière classique.

- Une intégration avec mise à jour du système inertiel par une position GPS : dans ce cas, on calcule à chaque époque une position GPS et on la compare avec la position inertielle. Si ces deux positions sont compatibles (il n'y a pas eu de saut de cycles) on fait une mise à jour du système inertiel avec la position GPS. Dans le cas contraire on essaie de corriger la position GPS avec la position inertielle avant de corriger la position inertielle avec la nouvelle position GPS obtenue. Cette solution nécessite d'observer en permanence au moins 5 satellites GPS.

- La dernière intégration possible est de faire une mise à jour du système inertiel par une observation de phase (double différence). On procède ensuite comme dans le cas précédent : si il y a un saut de cycle sur la mesure considérée on cherche à le corriger. Une fois la mesure GPS corrigée on peut mettre à jour la position inertielle.

Le choix s'est porté sur la dernière solution car elle permet une meilleure utilisation des informations du système. Deux satellites visibles seulement sont nécessaires (pour former une double différence), on peut corriger la position inertielle avec les mesures sans saut de cycle avant d'essayer de corriger les mesures GPS avec saut de cycles, et il sera plus facile d'ajouter des états au systèmes (nouveaux états dans la description du filtre de KALMAN).

Il est à noter toutefois qu'il n'y pas une très grande différence entre l'implémentation de la solution 3 et celle de la solution 2, aussi il peut être envisagé d'utiliser la solution 3 lorsque le véhicule est en marche et la solution 2 lors de ses arrêts (car il y a alors plus d'observations GPS pour un même point).

## B - Le logiciel GPS

Pour réaliser l'intégration choisie il faut disposer d'un logiciel permettant d'obtenir l'équation d'observation GPS. Ce logiciel a été réalisé en langage C et de façon modulaire afin de pouvoir utiliser les différentes sous-programmes lors de la réalisation de l'intégration.

Le logiciel ne peut traiter pour l'instant que des données provenant de récepteurs Ashtech (Récepteurs les plus courants à l'IGN actuellement.) Toutefois le logiciel possède sa propre structure pour les données GPS et tous les types de récepteurs peuvent être utilisés à condition de transférer les mesures dans un format propre au programme.

Le programme permet d'obtenir l'équation d'observation pour la pseudo-distance avec le code C/A. Les satellites GPS diffusent des codes pseudo-aléatoires permettant de déterminer des pseudo-distances. Le code C/A est le moins précis ainsi que l'équation de simple différence. Cette possibilité devrait être utilisée pour tenter de relier dans un même système de temps les mesures GPS et les mesures inertielles.

Enfin le programme permet de calculer l'observation de double différence pour la phase.

Afin de tester ces sous-programmes, un programme réalisant l'ajustement par moindres carrés de ces relations d'observation a aussi été réalisé.

### **Problèmes actuels**

- Le système de temps du système inertiel et le système de temps du GPS doivent être reliés afin de faire la mise à jour du système inertiel par la mesure GPS au bon instant. Si le véhicule portant le système inertiel se déplace à 50 km/h (15m/s), il faudra une synchronisation de l'ordre de 0.02 seconde pour ne pas introduire une erreur de plus de 5 cm dans la position.

### **5.3.3.3 Prolongements envisagés**

- Programmation de l'équation de navigation pour le système inertiel afin de reconstituer en post-traitement le positionnement effectué lors de la prise des mesures en temps réel.

- Modélisation des équations d'erreurs inertielles.

- Programmation au sein d'un filtre de KALMAN de ces équations d'erreurs.

- Programmation de la mise à jour par l'équation de double différence de phase GPS.

- Test et mise au point des programmes en utilisant des données GPS/Inertielles recueillies en Suède en 1991.
- Détermination des conditions pour une nouvelle campagne d'observation.
- Réalisation d'une nouvelle campagne de mesure.
- Traitement de la campagne, amélioration de la modélisation et des programmes.
- Démonstration des possibilités de l'intégration GPS/Inertielle pour le positionnement en géodésie et topographie.

#### 5.3.3.4 Références

- [BURTIN 92] D. Burtin : *Intégration du GPS et des techniques inertielles*, Conférence service de la recherche IGN (CC/G 25) - août 1992.
- [FORSBERG 92] R. Forsberg : *Inertial Surveying Methods (Inertial navigations principles. Gyros and accelerometers. Inertial surveying systems. ZUPTs and Kalman filtering. Inertial survey results. Inertial gravimetry. GPS/inertial hybrid systems. Examples from Scandinavia and Canada)*, Conférence présentée à ICB (Roumanie) - octobre 1992.

## 5.4 GÉODÉSIE POUR LES SCIENCES DE LA TERRE

### 5.4.1 Rattachement géodésique de marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale

par Guy WÖPPELMANN

#### 5.4.1.1 Contexte / Objectifs

L'objectif visé est la surveillance des variations séculaires du niveau des mers dans un système de référence géocentrique mondial tel que l'ITRF. Cette action s'appuie donc sur une autre action de recherche en cours au Lareg sous la responsabilité de Z. ALTAMIMI : "Maintenance du système de référence terrestre de l'IERS".

Avant d'atteindre cet objectif ambitieux, il est nécessaire de rattacher de manière précise les marégraphes de qualité (équipés d'instruments précis, contrôlés régulièrement et de préférence possédant une longue histoire d'observations) à des points dont les coordonnées sont déterminées avec la plus grande exactitude par des techniques spatiales (VLBI, SLR, LLR, GPS ou encore DORIS).

Ces rattachements permettront d'obtenir les informations nécessaires pour découpler deux signaux de caractéristiques voisines contenus dans les mesures marégraphiques, à savoir :

- les variations eustatiques du niveau des mers dues à un réchauffement général de la Terre,
- les variations d'altitudes provenant de mouvements épirogéniques proches de la côte.

L'application principale est de prédire un éventuel changement climatique à l'échelle du globe ainsi que d'évaluer l'incidence des activités humaines sur le climat (programmes internationaux GCOS et GLOSS).

D'autres applications moins ambitieuses bénéficieront également de ces résultats géodésiques, par exemple :

- en océanographie, elles contribueront au développement de modèles mathématiques réalistes de la circulation des océans et du transport de chaleur,
- en altimétrie radar sur satellite, pour la validation des observations et l'étalonnage de l'altimètre,
- en géodésie, pour la détermination d'un géoïde proche des côtes et la comparaison avec des résultats obtenus par d'autres techniques; ou encore, pour essayer d'unifier les systèmes d'altitudes,
- en géodynamique, pour l'étude et la modélisation des phénomènes épirogéniques régionaux, comme par exemple le rebond post-glaciaire,
- enfin, je citerai la surveillance et prédiction d'ondes de tempêtes ou tsunamis.

#### 5.4.1.2 Activité - Résultats

Cette action de recherche a démarré en septembre 1992 par l'intermédiaire de la thèse préparée par G. WÖPPELMANN, dirigée par C. LE PROVOST (IMG/LEGI). Les activités pour l'année 1992 se résument essentiellement à des études bibliographiques.

#### 5.4.1.3 Prolongements envisagés

Une campagne GPS de rattachements de marégraphes en Méditerranée occidentale est prévue par le SGN dans le courant de l'année 1993. Vers le printemps 1994, une autre campagne géodésique devrait se mettre en place en collaboration avec C. LE PROVOST, pour le rattachement de marégraphes installés récemment à Kerguelen, Crozet et Amsterdam dans le cadre des programmes internationaux GLOSS et WOCE.

#### 5.4.1.4 Références

[BOUCHER, WILLIS] C. Boucher & P. Willis : *Tide gauge connection using GPS* - XIXth Symposium, Vancouver (CDN), CC/G n° 525 - août 1987.

[BOUCHER, WILLIS] C. Boucher & P. Willis : *Rattachement de marégraphes au système géodésique mondial BTS par les systèmes GPS et DORIS* - Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels Paris, CC/G n° 537 - juin 1988.

[LE PROVOST 90] C. Le Provost : *Géoïde et niveau moyen de la mer* - Revue hydrographique internationale, Monaco, LXVII (1) - janvier 1990.

[LE PROVOST 92] C. Le Provost : *Le niveau de la mer, un index fondamental pour l'océanographie et la climatologie* 1992.

[WILLIS 90] P. Willis : *Projet de campagne GPS en Méditerranée occidentale* - 4ème Symposium sur la géodésie en Afrique (Tunis 21-27 mai 1990), archives IGN CC/G n° 555 - mars 1991.

[WÖPPELMANN 92] G. Wöppelmann : *Mémoire de DEA de l'Observatoire de Paris. Traitement de données GPS de la campagne Gig'91 en mode géodésique ultraprécis*- rédigé après un stage effectué à l'IGN sous la responsabilité de P. WILLIS, archives internes n° 105094 - juin 1992.

### 5.4.2 Participation aux recherches en Géophysique

par Thierry DUQUESNOY et Michel KASSER

#### 5.4.2.1 Contexte - Objectifs

L'IGN, à travers l'action de recherche ECORC, jusqu'en 1991 et TECTO en 1992 a participé à l'implantation de plusieurs réseaux géodésiques à des fins géophysiques. Cette collaboration a permis de nouer des liens très étroits avec la communauté géophysique française parmi lesquels :

- IPGP (JC. RUEGG, P. TAPPONNIER, M. DIAMENT),
- Université Paris-Sud (M. SEBRIER),
- Université Paris Paris VI (J. BOURGOIS, C. RANGIN, J. ANGELIER),
- Ecole Normale Supérieure (X. LE PICHON).

Elle est régie par un protocole d'accord entre l'IGN et l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) signé entre les deux parties en 1978 et renouvelé tous les ans par tacite reconduction.

Des liens ont aussi été tissés avec les organismes étrangers suivants :

- Instituto Geologico de la Universidad Autonoma de Mexico (UNAM, Mexique),
- Instituto Nacional de Estadística Geographica e Informatica (INEGI, Mexique),
- Bureau of Mine and Geosciences (Philippines),
- PHILippines VOLCanology and Seismology (Philippines),
- Philippines National Oil Compagny (Philippines),
- Directorate General Geology Mineral Ressources (Indonesie),
- Volcanological Survey of Indonesia.

Les sources de financement de ces études sont diverses puisque dans ces dernières années, l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers), la DRM (Délégation aux Risques Majeurs dépendant

du Ministère de l'Environnement), le MAE (Ministère des Affaires Etrangères), la CEE (DG XII) ont financé des programmes de recherche auxquels l'IGN a participé.

Depuis la mise en pratique des techniques spatiales, et principalement du GPS, depuis le milieu des années 1980, le nombre de projets de "sismotectogéodésie" ne cesse de croître dans la communauté géophysique française et européenne. Cela a conduit à l'établissement de plusieurs "réseaux 0" dont la remesure dans les prochaines années apportera les premiers résultats scientifiques:

- établissement d'un réseau de points autour du point triple de Jalisco (Mexique),
- établissement de réseaux autour de la faille centrale des Philippines et de la faille de Sumatra,
- établissement d'un réseau de points au Nord-Chili pour l'étude du cycle sismique de subduction.

Les objectifs de ces études sont de natures différentes :

- comparaison des résultats avec les données géologiques. Les phénomènes étudiés, en particulier les déformations, ont ils le même comportement à des échelles de temps différentes?
- dans les zones à hauts risques sismiques, la mise en évidence de mouvements précurseurs tels que les "séismes lents" difficilement détectables par des moyens sismologiques.

#### **5.4.2.2 Activités / Résultats**

Le DEA de Géophysique interne de l'Institut de Physique du Globe de Paris obtenu par T. DUQUESNOY dans le courant de l'année 1992 permet de valoriser encore plus l'activité de l'IGN au sein de la communauté Géophysique. Son sujet de stage de DEA consistait à étudier la sismicité au Nord-Chili afin de contraindre la géométrie de la subduction dans cette région et d'en tirer des conséquences sur la modélisation des déformations attendues lors d'un grand séisme (Magnitude > 7.5).

Une mission en novembre-décembre 1992 a permis l'établissement d'un réseau géodésique d'une quarantaine de points dans toute la région du Nord-Chili. Ce réseau permettra de mieux comprendre la genèse des tremblements de Terre et nous l'espérons, de mettre en évidence des mouvements et déformations précurseurs.

La participation en Grèce et en Egypte au programme IGS (International GPS Service) session 1992.

#### **5.4.2.3 Prolongements envisagés**

Le développement des techniques spatiales a permis la naissance de nombreux projets. Depuis 1989, nous avons donc mis en place de nouveaux chantiers d'études dont les résultats scientifiques n'apparaîtront que lors de leurs itérations futures.

En 1991, nous avons concentré nos études sur les Philippines et l'Indonésie. L'extension en 1993 à toute l'Asie du Sud-Est permettra d'avoir une vue à la fois régionale et locale sur une région tectoniquement très active et complexe.

Parallèlement à ces études, il semble indispensable de continuer la phase instrumentale de nos recherches. Ainsi une étude sur l'emploi de la station Laser Ultra Mobile, sans doute dans le cadre d'une thèse, est indispensable.

#### **5.4.2.4 Références**

[DUQUESNOY] T. Duquesnoy : *Etude du cycle sismique, exemple du Nord-Chili*. Rapport de stage de DEA de Géophysique Interne, IPGP, PARIS VII

[DUQUESNOY et al] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Kasser & M. Sébrier : *Etude géodésique de la partie centrale et méridionale de Sumatra (Indonésie) : contribution à l'étude sismotectonique de la faille de Semangka*. Publication IGN, 76 pages - mai 1992.

[DUQUESNOY et al] T. Duquesnoy, J.C. Ruegg & A. Hernandez : *Implantation d'un réseau géodésique autour du point triple de Jalisco*. Publication IGN - juin 1992.

## 6 - LISTE DES PUBLICATIONS

*Cette liste n'est pas exhaustive (en particulier, les documents techniques internes émis par les projets.)*

### 6.1 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

- *soumises à un Comité de Lecture*

[ALTAMIMI et al 92] Z. Altamimi, C. Boucher & L. Duhem : *The Worldwide Centimetric Terrestrial Reference Frame and its associated velocity field*, The World Space Congress, 29th Plenary Meeting of the COSPAR, Washington DC (USA) - 1992.

[BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & Z. Altamimi : *Development of a Conventional Terrestrial Reference Frame*, CDP/AGU Monograph - 1992.

[PRIOU et al] D. Priou, G. Comer & S. Bonazzola : *General relativistic rotating bodies in the 3 + 1 formalism : a numerical investigation*, à soumettre à Physical Review.

[PRIOU et al] D. Priou, G. Comer & S. Bonazzola : *General relativistic rotating bodies with a magnetic field*, à soumettre à Physical Review.

[PRIOU et al] D. Priou, M. Leins & P. Haensel : *L > 2 torsional oscillations of general relativistic bodies with a solid crust*, à soumettre à Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

[RIAZANOFF 92] S. Riazanoff, P. Julien, B. Cervelle & J. Chorowicz : *Extraction et Analyse Automatiques d'un Réseau Hiérarchisé de Thalwegs*, Int. J. Remote Sensing, vol. 13, pp. 337-364 - 1992.

- *non soumises à Comité de Lecture*

[ALTAMIMI, BOUCHER 92] C. Boucher & Z. Altamimi : *Le système de référence terrestre de l'IERS : Nouveau système de référence UAI/UGGI*, Journées 1992 systèmes de référence spatio-temporels, Observatoire de Paris (F).

[BALMINO 92] G. Balma, G. Balmino, M. Sarrailh & D. Toustou : *Géοiδe français; état d'avancement et programme de travail au GRGS/BGI*, Bureau Gravimétrique International, Toulouse (F) - 1992.

[BEUTLER, BOTTON 92] G. Beutler & S. Botton : *Aspects techniques de la localisation précise par GPS*, présenté à la Journée GPT/CNIG, à Paris (F) - le 3 septembre 1992.

[BEUTLER, BOTTON 92] G. Beutler & S. Botton : *L'apport de l'International GPS Geodynamics Service (IGS) pour la géodésie et la cartographie*, présenté à la Journée GPT/CNIG, à Paris (F) - le 3 septembre 1992.

[BOUCHER et al 92] C. Boucher, Z. Altamimi, JPh. Dufour & H. Fagard : *The IERS Terrestrial Reference Frame and its extensions by IGS and DORIS*, Dynamics of the Solid Earth (DOSE) Meeting, Greenbelt (USA), October 13-15 - 1992.

[BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & Z. Altamimi : *The EUREF Terrestrial Reference System and its first realizations*, EUREF Meeting, Berne (CH) - March 4-6 - 1992.

[BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & Z. Altamimi : *The IERS Terrestrial Reference System*, 6th International Symposium on Satellite Positioning, Columbus (USA) - March 17-20 - 1992.

[BOUCHER, DUFOUR] C. Boucher & JPh. Dufour : *The DORIS tracking system. A progress report*, présentation au 6th International Symposium on Satellite Positioning, Colombus (USA), publication IGN CC/G 567, archives SGN 27.673 - mars 1992.

[BURTIN 92] D. Burtin : *Intégration du GPS et des techniques inertielles*, Conférence Service de la Recherche IGN (CC/G 25) - août 1992.

[DANIEL 92] L. Daniel : *Le centre de données global de l'IGN*, présenté à la Journée GPT/CNIG, à Paris (F) - le 3 septembre 1992.

[DAVID et al 92] B. David, L. Raynal, V. Mansart & G. Schorter : *GEO2 : un modèle de données géographique avec O2*, Journées AFCET, Versailles (F) - juin 1993.

[DAVID, BILLOTEY 92] B. David & P. Billotey : *La production d'information géographique numérique à l'Institut Géographique National*, Revue des Sciences de l'Information Géographique et de l'Analyse Spatiale, vol 1, n° 2, 1991 - publié en 1992.

[DUFOUR et al] JPh. Dufour, C. Boucher, P. Willis, M. Gavoret & M. Lansman : *Localisation géodésique à l'aide du système DORIS*, présentation à la Journée Recherche IGN 1991, Saint-Mandé (F), publication IGN CC/G 568, archives SGN 27.672 - février 1992.

[DUMOLARD, DAVID 92] P. Dumolard & B. David : *Les fonctions d'analyse dans les SIG du futur*, Actes de MARI'92, pp. 57-63 - avril 1992.

[DUQUENNE 92] H. Duquenne : *The new digital terrain model of France*. Presented at the 1st Continental Workshop on the geoid in Europe, Prague (CS), may 11-14 1992, Institut Géographique National, Paris (F) - mai 1992.

[DUQUESNOY et al 92] T. Duquesnoy, JC. Ruegg & A. Hernandez : *Implantation d'un réseau géodésique autour du*

point triple de Jalisco. Publication IGN - juin 1992.

[DUQUESNOY et al 92] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Kasser et M. Sébrier : *Etude géodésique de la partie centrale et méridionale de Sumatra (Indonésie) : contribution à l'étude sismotectonique de la faille de Semangka*, Publication IGN, 76 pages - mai 1992.

[GRELOT 92] JPh. Grelot : *Expliciter l'implicite : le défi permanent de la cartographie*. 15ème conférence de l'Association Cartographique Internationale, octobre 1991, Actes, vol. 1, pp. 233-244, Bulletin du Comité Français de Cartographie n° 132, pp. 21-26 - juin 1992.

[GRELOT 92] JPh. Grelot : *Feedback from Society : Users-Community Oriented Views*, Proceedings of the Seminar on Teaching Surveying and Mapping Aspects of Visualisation and GIS, ICA Commission on Education and Training, pp. 57-59 - août 1992.

[GRELOT 92] JPh. Grelot : *Les bases de données de l'IGN-France*, Colloque FI3G, Actes pp. 337-340 - mai 1992.

[GRELOT 92] JPh. Grelot : *Marketing cartographique à l'IGN-France*. 15ème conférence de l'Association Cartographique Internationale, octobre 1991, Actes, vol. 1, pp. 416-420, Bulletin du Comité Français de Cartographie n° 132, pp. 18-20 - juin 1992.

[GRELOT 92] JPh. Grelot : *Quelques principes de cartographie statistique*, Bulletin du Comité Français de Cartographie n° 132, pp. 18-27 - juin 1992.

[GUIDETRONIC] *Le guide intelligent. Le standard de la navigation automobile*, FI3G, pp. 351-356 - 1992.

[GURTNER et al] W. Gurtner, W. Fankhauser, S. Ehrnsperger, W. Wende, W. Friedhoff, H. Habrich & S. Botton : *EUREF-89 GPS campaign. Results of the Processing by the "Berne Group"*, publié dans le rapport n° 1 de la Commission pour un réseau de référence européen (EUREF), Section 1 de l'Association Internationale de Géodésie.

[IGN 92] *Activité du COGIT*, Bulletin d'Information de l'IGN n° 60, pp. 16-18.- avril 1992.

[JAMET 92] O. Jamet : *L'assistance à la saisie photogrammétrique par interprétation automatique de photographies aériennes*, Euroconférences, Roussillon (F), IGN - septembre 1992.

[KASSER 92] M. Kasser : *Improvement of SLR accuracy, a possible new step*, 8th International Workshop on SLR Instrumentation, Annapolis, MA (USA), 7 pages - 18-22 mai 1992.

[LE MEN 92] H. Le Men : *Application de la reconnaissance des formes à la cartographie*, session de la 21ème école internationale d'informatique de l'AF CET, Pointe à Pitre - juillet 1992.

[LE MEN 92] H. Le Men : *Elaboration de MNT par corrélation automatique; différents algorithmes et application à l'extraction de lignes de thalwegs*, Forum CARTEL'92, Libreville (Gabon) - novembre 1992.

[LE PAPE] M. Le Pape : *Impact du GPS sur le réseau géodésique français (RGF)*, conférence du 7 novembre 1991 à la Rencontre AFT, Cachan (F) - mars 1992.

[LE PAPE] M. Le Pape : *Les réseaux géodésiques, Systèmes de référence et GPS*, conférence faite lors du Symposium sur la cartographie et la télédétection, Forum CARTEL'92, Libreville (Gabon) - novembre 1992.

[MELBOURNE et al 92] WG. Melbourne, WI. Bertiger, ES. Davis, SM. Lichten, RJ. Muellerschoen, TM. Munson, SC. Wu, TP. Yunck, BG. Williams, BD. Tapley, BE. Schutz, P. Abusali, HJ. Rim & P. Willis : *First results from the GPS Flight Experiment on Topex/Poseidon*, présenté à l'AGU Fall Meeting, San Francisco (USA) - décembre 1992.

[AFFHOLDER 92] JG. Affholder : *Recherche sur la Généralisation*, Euroconférences, Roussillon (F), IGN - septembre 1992.

[MOTET 92] S. Motet : *Les besoins pour la gestion de l'historique dans les SIG*, Actes de SIG/GIS - septembre 1992.

[NOLL et al 92] CE. Noll, Y. Bock Noll & L. Daniel : *IGS network data center report, Dynamics of the Solid Earth, Investigators Working Group Meeting*, NASA/GSFC - octobre 15 1992.

[PIERRON, KASSER 92] F. Pierron & M. Kasser : *Présentation de la FTLRS*, SLR Commission du CSTG, Londres (GB) - décembre 1992.

[PIERRON, KASSER 92] F. Pierron & M. Kasser : *The French Highly Mobile Laser Ranging Unit*, 8th International Workshop on SLR Instrumentation, Annapolis, MD (USA), 7 pages - 18-22 mai 1992.

[ROTHACHER et al 92] M. Rothacher, G. Beutler, E. Brockmann, S. Kankhauser, W. Gurtner, T. Springer, S. Botton, L. Mervart, A. Wiget & U. Wild : *Processing at the "Center for Orbit Determination in Europe" (Code) during the IGS 1992 campaign*, présenté à la session IGS de Greenbelt - le 15 octobre 1992.

[RUAS, LAGRANGE 92] A. Ruas & JPh Lagrange : *IGN's research on generalization*, Communication à la réunion du groupe de travail de l'ACI sur la généralisation, lors du Congrès 1992 de l'ISPRS.

[THOM et al 92] Ch. Thom, I. Jurvillier & P. Mousnier Lompré : *Réalisation d'un prototype de caméra aérienne numérique*, Forum FI3G, Strasbourg - mai 1992.

[WILLIS et al 92] P. Willis, C. Boucher & F. Cadot : *Etude des systèmes de référence liés au projet Topex/Poseidon*, présenté à la Journée Systèmes de Référence Spatio-Temporels de l'Observatoire de Paris, Paris (F) - juin 1992.

## 6.2 MÉMOIRES DE THESEES

- [BENMOHAMED 93] M. Benmohamed : *Etude des bases de données localisées de grande extension*, thèse de doctorat de l'Université Paris 7, soutenance prévue pour fin mars 1993.
- [LAGRANGE 92] JPh. Lagrange : *OGRE : un système expert pour la génération de requêtes relationnelles*, thèse de doctorat de l'Université Paris Dauphine - décembre 1992.

## 6.3 PUBLICATIONS TECHNIQUES ET RAPPORTS

- [AIRAULT 92] S. Airault : *Extraction automatique du réseau routier*, rapport de recherche, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - décembre 1992.
- [BAZZANA 92] JM. Bazzana : Rapport de stage : *participation à l'installation d'un logiciel de calcul utilisant les méthodes de la géodésie intégrée*, Service de la Recherche, laboratoire LAREG, IGN - 1992.
- [BEAUVILLAIN 92] E. Beauvillain : *Evaluation de la Précision des Modèles Numériques de Terrain dans Différentes Configurations Stéréoscopiques de l'Instrument HRG*, rapport intermédiaire étude CNES, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.
- [BEAUVILLAIN 93] E. Beauvillain : *Evaluation de la précision des Modèles Numériques de Terrain obtenus par corrélation automatique dans différentes configurations stéréoscopiques de l'instrument HRG*, rapport final étude CNES, Service de la Recherche laboratoire MATIS (anciennement COGIT), IGN - février 1993.
- [BELLIER, KASSER 92] O. Bellier et M. Kasser : *Expérimentation de deux instrumentations de télémétrie laser, l'une aéroportée et l'autre satellisée, pour la mesure rapide de déformations verticales : résultats préliminaires des simulations*, rapport IGN-SNEA(P), n° 7862, 65 pages - septembre 1992.
- [BERNARD] M. Bernard : *Vecteurs et capteurs. La spatiocarte : processus de production*, communication au Forum CARTEL'92, Libreville (Gabon) - décembre 1992.
- [BOUCHER, ALTAMIMI 92] C. Boucher & Z. Altamimi : *The IERS GPS Terrestrial Reference Frame*, IERS Technical Note 10, Observatoire de Paris - 1992.
- [CADOT 92] F. Cadot : *Combinaisons de systèmes de référence terrestres à partir de données d'orbites de satellites : application au projet Franco-américain Topex-Poseidon*, mémoire de DEA de l'Observatoire de Paris, 1992.
- [CANTOU] JPh. Cantou : Cours, *Géométrie et Cartographie SPOT* au séminaire de Télédétection, Djakarta - décembre 1992.
- [CHIRIE] F. Chirié : *Programme de positionnement automatique des noms de communes*, rapport de DEA-SIG de l'ENSG, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - 1992.
- [DUQUESNOY] T. Duquesnoy : *Etude du cycle sismique, exemple du Nord-Chili*, rapport de stage de DEA de Géophysique Interne, IPGP, PARIS VII.
- [ELOUAFI 92] SM. Elouafi : *Etude de Paramètres de Texture pour la Segmentation des Photographies Aériennes Numérisées*, rapport de stage, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.
- [FEIV] Documentation FEIV, document interne IGN.
- [GALTIER] B. Galtier : *Image maps*, communication à l'Année Internationale de l'Espace, Munich (D) - avril 1992.
- [GALTIER] B. Galtier : *L'image numérique*, communication au Colloque FI3G, Strasbourg (F) - mai 1992.
- [GALTIER] B. Galtier : *Utilization of GPS (Global Positioning System) for mapping*, communication au Congrès de l'ISPRS, Washington, DC (USA) - août 1992.
- [GALTIER] B. Galtier : *Les produits cartographiques dérivés des images satellitaires*, communication aux Assises du Génie Civil, Paris (F) - décembre 1992.
- [HIRSHAUER 92] V. Hirshauer : *Précision de Pointé d'un Corrélateur Automatique d'Images*, rapport de stage, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.
- [IGN 92] *Activité du COGIT, Bulletin d'Information de l'IGN* n° 60, pp. 16-18 - avril 1992.
- [JAMET 92] O. Jamet : *Interprétation Automatique Multitemporelle de l'Occupation du Sol sur Images Satellite: Méthodologie et Résultats*, rapport de fin d'étude, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - août 1992.
- [KASSER et al] M. Kasser, O. Bellier, Y. Egels, C. Million, Ch. Thom et D. Fourmaintraux : *Etude d'un procédé de télémétries laser aéroportées sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol*, rapport IGN-SNEA(P) n° 7862, 90 pages - mars 1992.
- [LAGRANGE 92] JPh. Lagrange : *Etat d'avancement de l'action de recherche au 19 Juin 1992*, rapport intermédiaire, 11 pages, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - juin 1992.
- [LAGRANGE 92] JPh. Lagrange : *Etat d'avancement de l'action de recherche pour l'année 1992*, DT 1364, 6 pages - décembre 1992.
- [LE ROUX 92] D. Le Roux : *Contrôle de la Cohérence d'un Réseau Hydrographique avec un Modèle Numérique de Terrain*, rapport de stage, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.
- [LECORDIX 92] F. Lecordix : *Compte rendu de recherche sur le placement automatique de toponymes*, note DT 1174 du 28 octobre 1992.
- [MOREAU 92] E. Moreau : *Application à la Cartographie des Modèles Numériques de Terrain, calculés par la Méthode de la "Grille Elastique"*, rapport de stage, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - septembre 1992.
- [PRIOU et al 92] D. Priou, P. Charlot, M. Feissel & N. Essaifi : *GLOBAL Radio Interferometric Analysis*, modalités du projet - 1992.

- [RUAS 92] A. Ruas : *Compte-rendu de la présentation du logiciel de généralisation à l'IGUG*, rapport IGN - mai 1992.
- [RUAS 92] A. Ruas : *Etat de l'art en généralisation*, rapport au Secrétariat EUREKA France, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN - novembre 1992.
- [RUAS 92] A. Ruas : *Résumé d'articles sur la généralisation*, rapport IGN, Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - 1992.
- [SCHORTER] G. Schorter : *GéO<sub>2</sub>, synthèse des travaux 1992*, Service de la Recherche, laboratoire COGIT, IGN, décembre 1992.
- [SCHORTER] G. Schorter : *GéO<sub>2</sub>, changement des données de FEIV vers GéO<sub>2</sub>*, FLEXIMAGE et Service de la Recherche, Laboratoire COGIT, IGN - août 1992.
- [THOM, JURVILLIER 92] Ch. Thom & I. Jurvillier : *Compte-rendu du premier essai en vol de la caméra numérique*, Service de la Recherche, Laboratoire LOEMI, IGN - juin 1992.
- [WILLIS, BOUCHER 92] P. Willis & C. Boucher : *Analyse d'un logiciel de combinaisons de jeux de coordonnées tridimensionnelles de points géodésiques et de positions de satellite : Applications à la mission Topex/Poseidon*, IGN DT, IT/G n° à paraître - 1992.
- [WÖPPELMANN 92] G. Wöppelmann : *Traitement de données GPS de la campagne GIG'91 en mode géodésique ultraprécis*, Mémoire de DEA de l'Observatoire de Paris, rédigé après un stage effectué à l'IGN sous la responsabilité de P. WILLIS, archives internes IGN n° 105094 - juin 1992.

## **Contacts :**

### **Service de la Recherche**

Hervé LE MEN - poste 8315

### **Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Image pour la Stéréorestitution (MATIS)**

Olivier JAMET - poste 8069

### **Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique (COGIT)**

Benoît DAVID - poste 8003

### **Laboratoire d'Opto-Electronique et de Micro-Informatique (LOEMI)**

Christian THOM - poste 8240

### **Laboratoire de REcherche en Géodésie (LAREG)**

Pascal WILLIS - poste 8329



**Directeur de la Publication** : Claude BOUCHER

**Rédaction** : Jacques SCHWENGLER, Isabelle MELOT

Édité par le Département Communication  
avec le concours du bureau audiovisuel de l'ENSG.

Imprimé à l'Institut Géographique National  
Copyright Bulletin d'Information de l'I.G.N.

136 bis, rue de Grenelle - 75700 Paris  
Tél. : 43.98.80.00

Imprimerie de l'INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL

Dépôt légal 2<sup>e</sup> trimestre 1993  
N° d'édition : 166 – N° d'impression : 187





