



**HAL**  
open science

## La recherche à l'IGN : activité 1998

Serge Motet, Nicolas Boichis, Didier Boldo, Frank Fuchs, Franck Jung, Yann Wehrstedt, Philippe Hottier, Christian Thom, Oliver Bock, Arnaud de La Losa, et al.

► **To cite this version:**

Serge Motet, Nicolas Boichis, Didier Boldo, Frank Fuchs, Franck Jung, et al.. La recherche à l'IGN : activité 1998. Bulletin d'information de l'IGN N°70. 1999. hal-02372724

**HAL Id: hal-02372724**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372724v1>**

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

ISSN 0477 2218

# BULLETIN D'INFORMATION DE L'IGN



INSTITUT  
GÉOGRAPHIQUE  
NATIONAL

# RECHERCHE 98

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

**Activité 1998**



# La recherche en 1998

---

01 Classement IGN-SR : 990001/R-LIV

02 Livre

03 Nom et adresse du directeur de la publication :

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

04 Rédacteur en chef : Serge Motet (IGN)

05 Réalisé au Service de la Recherche de l'IGN

IGN  
2-4 avenue Pasteur  
F-94165 SAINT MANDÉ CEDEX

06 Titre : **La recherche en 1998**

07 Date d'édition : 1999

13 Numéro 70

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

---

**Abonnement gratuit & courrier, s'adresser à :**

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

téléphone : 01 43 98 83 19 - télécopie : 01 43 98 81 71

isabelle.melot@ign.fr

---

## Résumé

Ce numéro présente les progrès de la recherche réalisée au cours de l'année 1998 à l'IGN. Les sujets plus particulièrement traités concernent l'extraction de détails topographiques sur photos, la photogrammétrie et la radiométrie des capteurs aéroportés, les modèles numériques de terrain, la télémétrie laser, les représentations tridimensionnelles et l'adéquation aux usages des mesures de qualité et des métadonnées.

**Mot-clé principal :** Information géographique.

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

---

**En couverture :** *exemple de processus de généralisation automatique du réseau routier de la BD Carto pour le 1 : 250 000.*

Dans ce processus, chaque objet est autonome et son choix d'action est guidé par les contraintes cartographiques.

Les contraintes cartographiques guident le choix des opérations à effectuer (ici, les contraintes de lisibilité incitent, selon les cas, l'objet à se lisser, s'élargir, éliminer certains de ses virages ou se découper pour focaliser sur une partie de l'objet) et valident ou invalident ces opérations (ici la contrainte de précision planimétrique invalide certaines opérations). Pour plus de détails, se reporter à l'article d'Anne Ruas & Jean-François Hangouët, pages 107 à 112.

# Table des matières

---

<b>A</b>	<b>La recherche à l'IGN</b>	<b>1</b>
----------	-----------------------------	----------

---

<b>B</b>	<b>Quelques actions marquantes</b>	<b>5</b>
B.1	Extraction des ronds-points dans les images aériennes : modélisation et stratégie	5
B.2	Calcul automatique de points de liaison pour la caméra numérique	15
	Constitution automatique de tableau d'assemblage	15
	Recherche automatique de points de liaison	19
	Filtrage des points multiples	22
	Validation photogrammétrique	23
B.3	Une structure de modèle numérique de terrain (MNT) intégrant reliefs hétérogènes et discontinuité	25
B.4	Relations entre précision radiométrique et précision géométrique en imagerie numérique	35
B.5	Télémétrie laser aéroportée pour la surveillance des mouvements verticaux du sol (TAMS) : résultats de la première campagne aérienne	43
B.6	Gestion tridimensionnelle de données géographiques	53
B.7	Un modèle de rôles pour mettre en correspondance un besoin d'utilisateur et des données géographiques	61
B.8	Sensibilité des applications géographiques aux incertitudes : lien avec le contrôle qualité	71

---

<b>C.</b>	<b>Bilan des actions de recherche</b>	<b>77</b>
C.1	Image et photogrammétrie	77
C.1.1	Lecture automatique de cartes scannées	77
C.1.2	Conception et mise en œuvre d'algorithmes pour la restitution 3-D	79
	Modèles numériques d'élévation (MNE) de précision	79
C.1.3	Restitution des bâtiments pour la cartographie à grande échelle	80
	Modèles numériques d'élévations	80
	Reconstruction du bâti pour la cartographie à grande échelle	82
C.1.4	Détection de changement pour la BD Topo	83
	Axe comparaison image-image	83
	Axe comparaison vecteur-image	84
C.1.5	Extraction automatique des routes sur images aériennes	84
C.1.6	Restitution automatique des carrefours routiers	86
C.1.7	Habillage photogrammétrique de sites urbains	86
C.1.8	Bibliothèque de photogrammétrie numérique à l'usage des chercheurs	88
C.2	Instrumentation	91
C.2.1	Fabrication d'une caméra numérique	91
C.2.2	Nouvelles technologies pour la télémétrie laser sur satellites	93
C.2.3	Prototype d'instrumentation aéroportée télémétrie laser (dispositif TAMS)	93
C.2.4	Systématismes des prises de vues aériennes et trajectographie	95

---

# Table des matières

---

<b>C.3 SIG et cartographie</b>	<b>97</b>
C.3.1 Mécanismes de mise à jour entre bases de données géographiques	95
C.3.2 Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques	97
C.3.3 Appariement de données géographiques	98
C.3.4 Qualité des bases de données géographiques	100
C.3.5 Interopérabilité	101
C.3.6 Généralisation du linéaire et modélisation par l'équation intrinsèque	104
C.3.7 Généralisation du réseau - application au réseau	107
C.3.8 Généralisation contextuelle	107
C.3.9 Maquette de généralisation	113
C.3.10 Étude préalable à la création d'un centre d'étude sur les applications des SIG au sein de l'ENSG	114
C.3.11 Étude des applications des SIG aux transports	115
<b>C.4 Géodésie</b>	<b>117</b>
C.4.1 Amélioration de l'ITRS	117
C.4.2 Positionnement DORIS	117
C.4.3 Traitement de données GPS en Antarctique	119
C.4.4 JASON	120
C.4.5 GNSS	121
C.4.6 Niveau moyen des mers : suivi par les techniques de géodésie et de marégraphie	122
C.4.7 Géodynamique et géophysique	123
C.4.8 GPS et soutien à l'IGS	124
C.4.9 Repère International de Référence Terrestre (ITRF)	125
C.4.10 Réseau GPS Permanent (RGP)	126

---

<b>D. Publications</b>	<b>129</b>
<b>Thèses de doctorat</b>	<b>129</b>
Articles de journal scientifique	129
Communications en congrès	131
Rapports de stage	133
Rapports internes et comptes rendus	133
Manuels et documentation	134

---

Serge Motet

## Contexte

La première mission de l'IGN est une mission de production cartographique ou photographique. L'IGN prend des photos aériennes et rédige des cartes sur l'ensemble du territoire national. En outre, l'IGN a d'autres missions : de documentation, de formation ... et de recherche.

La mission de recherche de l'IGN s'appuie sur l'activité de production (ou plutôt, la précède). Les actions de recherche sont finalisées, conçues pour aboutir à moyen ou long terme à un procédé, un produit ou un service.

Plus précisément, les orientations de la recherche depuis quelques années sont motivées par l'amélioration de la productivité de l'IGN. Cela constitue encore aujourd'hui la plus grande part de l'activité de recherche. Par exemple, les recherches sur la généralisation cartographique ont pour finalité d'accroître la productivité dans la rédaction des cartes.

Une autre part de la recherche concerne le développement de nouveaux produits. Les modèles d'élévation en sont un exemple significatif. Ces modèles sont des représentations en trois dimensions, incluant, en particulier, des bâtiments sous forme de volumes. Ces modèles ne servent pas à faire des cartes. Ils s'adressent à de nouvelles applications - par exemple, en urbanisme - utilisant des systèmes interactifs de visualisation et de conception.

Les images de la caméra numérique constituent un autre exemple de produit nouveau.

Une troisième part de la recherche se rapporte à la mise en place de nouvelles infrastructures. Dans cette catégorie, on peut citer les recherches sur la diffusion des mises à jour, l'interopérabilité et les études sur le réseau GPS actif.

## Structure de la recherche

La recherche est menée par quatre laboratoires. Le tableau A.1 présente le domaine de compétence de chaque laboratoire.

Le tableau A.2 montre les effectifs au 31 décembre 1998. Concernant les colonnes de ce tableau, il faut rappeler que les thésards de l'IGN sont, soit des ingénieurs fonctionnaires, soit des étudiants en contrat de recherche. Les stagiaires de troisième cycle (environ une vingtaine) ne sont pas comptés dans le tableau.

*tableau A.1 : domaines des laboratoires*

<b>COGIT</b>	Système d'information géographique et cartographie
<b>LAREG</b>	Géodésie
<b>LOEMI</b>	Instrumentation optoélectronique
<b>MATIS</b>	Traitement d'images et photogrammétrie

*tableau A.2 : effectif au 31 décembre 1998*

	<b>chercheurs</b>	<b>dont thésards</b>	<b>dont contrats de recherche</b>	<b>support</b>	<b>TOTAL</b>
<b>LOEMI</b>	<b>3</b>	0	0	2	<b>5</b>
<b>MATIS</b>	<b>15</b>	5	3	2	<b>17</b>
<b>COGIT</b>	<b>18</b>	8	2	1	<b>19</b>
<b>LAREG</b>	<b>12</b>	3	1	1	<b>13</b>

## Laboratoire OEMI

La principale recherche du laboratoire OEMI est le développement d'une caméra numérique aéroportée. Cette caméra utilise une matrice CCD comme capteur. Ce type de capteur a une dynamique très supérieure au film. Il peut être utilisé beaucoup plus facilement dans un processus numérique puisqu'il dispense du passage des films au scanneur.

## Laboratoire MATIS

Les activités de recherche du laboratoire MATIS s'articulent autour de quatre axes.

### Reconnaissance de détails topographiques

Dans cet axe, on part des photographies aériennes. On veut y reconnaître automatiquement les détails topographiques, tels que les routes, les maisons ... deux aspects sont pris en compte : la détection des détails (comment les trouver) et la restitution (décrire précisément leur forme).

Cette recherche se fonde donc sur l'analyse d'image et sur la photogrammétrie, c'est-à-dire la restitution d'objets en trois dimensions, en utilisant au moins deux photos prises sous des angles différents.

### Détection de changements

En parallèle avec l'axe précédent visant à saisir rapidement la topographie, l'IGN étudie comment trouver les changements à partir de photos et de données cartographiques existantes plus anciennes. Par exemple, il s'agit de détecter automatiquement qu'une maison est sur la photo alors qu'elle n'est pas dans les données existantes.

### Cartes scannées

Le laboratoire MATIS étudie la reconnaissance automatique de symboles sur des cartes qu'on a numérisées avec un scanneur. Ces symboles sont les noms, les lignes ou des symboles ponctuels. L'objectif est d'obtenir des bases de données simplifiées ou de fournir des informations complémentaires pour la reconnaissance automatique sur photos.

### 3-D en zones urbaines

Le dernier axe du laboratoire MATIS concerne un nouveau produit : les modèles de bâtiments en trois dimensions. En fait, de tels modèles sont déjà utilisés en architecture mais il est nécessaire d'automatiser en partie leur production pour qu'ils soient davantage utilisés. On part des photos aériennes et utilise la corrélation stéréoscopique automatique.

Le laboratoire MATIS travaille aussi sur l'appariement de modèles et de clichés terrestres. L'objectif est de plaquer sur les modèles de bâtiments des photos des façades.

## Laboratoire COGIT

Le laboratoire COGIT travaille dans deux domaines.

### Systèmes d'information géographique

Le premier domaine concerne la gestion de l'information géographique. Il se situe à l'intersection de deux domaines informatiques : la géométrie algorithmique et les bases de données. Son essor est stimulé par le développement des grandes bases de données (en particulier celles de l'IGN) et par l'accroissement des échanges d'information.

Plus précisément, les sujets de recherche sont :

- la modélisation et la gestion de la qualité de l'information géographique,
- la propagation des mises à jour de l'information géographique entre des systèmes indépendants,
- l'appariement de données saisies à des précisions et selon des spécifications différentes.

### Généralisation cartographique

Ce second domaine s'intéresse à la lisibilité et à la clarté des cartes. Il traite des méthodes et des règles que le cartographe applique pour éviter les superpositions, mettre en relief les éléments importants, supprimer les confusions de lecture. Le laboratoire COGIT travaille à rendre explicite les règles et à automatiser les méthodes.



Ce travail s'appuie sur deux approches :

- la géométrie algorithmique pour le traitement local et,
- les méthodes d'intelligence artificielle, comme les " systèmes multi-agents ", pour la stratégie d'application des règles et des algorithmes.

## Laboratoire LAREG

Le laboratoire LAREG effectue des recherches dans le domaine de la Géodésie. Les recherches s'articulent autour :

- des systèmes de géodésie spatiale : GPS, Doris, Glonass, Prare,
- des systèmes et des réseaux de référence terrestres,
- du champ de pesanteur, des références verticales et du niveau moyen des mers,
- de la contribution de la géodésie à la géophysique.

## GPS

Le laboratoire LAREG participe au service international IGS qui calcule la trajectoire des satellites GPS, ainsi que d'autres paramètres. Ce service est utilisé pour des applications scientifiques ou techniques de positionnement précis.

Au niveau national, le laboratoire travaille sur un réseau de récepteurs GPS permanent en France métropolitaine. Ces récepteurs sont reliés à un serveur qui diffuse les observations et calcule des produits.

## Systèmes de référence terrestre

Le laboratoire LAREG contribue depuis de nombreuses années au Service International de Rotation de la Terre (IERS) et en particulier au Système International de Référence Terrestre (ITRS). En se fondant sur cette contribution, le laboratoire LAREG analyse les séries temporelles de l'ITRS. Il mène des recherches sur leur traitement stochastique et sur les modèles physiques sous-jacents.

Ces recherches visent en particulier à améliorer les connaissances géophysiques comme le mouvement du centre des masses de la Terre et les déformations de la croûte terrestre.

# Résultats

## Applications

Les progrès réalisés en 1998 sont détaillés dans les articles de la partie B de ce bulletin. Concernant les applications, on peut relever, entre autres, les avancées suivantes.

### Photogrammétrie

À partir de logiciels développés à l'IGN, un outil d'aéro-triangulation a été complètement repensé et doté d'une interface graphique.

Des outils de recherche de points de liaison automatique et construction de tableau d'assemblage ont été développés et testés.

### Système d'Information Géographique (SIG)

Les études sur la propagation des mises à jour ont suffisamment progressé pour permettre des expériences sur les livraisons différentielles de la BD Carto. Un modèle pour les données géographiques en trois dimensions a été mis au point.

### Cartographie

Le projet Agent, relevant du programme européen Esprit, pour la réalisation d'un logiciel de généralisation en utilisant la modélisation multi-agents a débuté.

### Géodésie

Une expérience pilote pour un réseau permanent de localisation de précision centimétrique a été lancée.

## Publications

On trouvera la liste des publications en partie D de ce bulletin.

## Contrats de recherche

Le laboratoire COGIT a participé à trois projets européens :

- le projet Commuter du programme Esprit sur les échanges de mises-à-jour et sur les bases de données spatio-temporelles,
- le projet Geoserve du programme Applications Télématiques sur la diffusion d'information géographique,
- le projet Agent du programme Esprit - recherche à long terme - sur la généralisation cartographique et les systèmes multi-agents.

Les laboratoires de l'IGN ont également réalisé plusieurs études pour le Ministère de la Défense.

## Manifestations

Comme chaque année, les Journées Recherche de l'IGN ont permis de présenter les résultats de recherche aux agents de l'IGN et aux chercheurs externes à l'IGN. Elles ont eu lieu les 4 et 5 mai.

L'IGN a organisé les troisièmes Journées Cassini, les 26 et 27 novembre. Le thème était : les nouveaux usages de l'information géographique. Ces journées étaient placées sous le patronage du Groupement de Recherche Cassini (GdR 1041 du CNRS).

## Doctorat

Les thèses de doctorat suivantes ont été soutenues en 1998 :

Nicolas Regnault	11 mai	Généralisation du bâti : structure spatiale de type graphe et représentation cartographique.
Mathieu Barrault	13 novembre	Résolution d'un problème à forte combinatoire et présentant un grand nombre de contraintes variées : le placement cartographique des écritures.
Jean-François Hangouët	24 novembre	Approches et méthodes pour l'automatisation de la généralisation cartographique ; application en bord de ville.
Olivier Jamet	11 décembre	Comparaison vecteur-images pour la détection des changements des bâtis d'une base de données topographiques.

## Chercheurs invités

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

- Suzanna Mac-Master du *Macalester College* (États-Unis), du 26 mai au 12 juin,
- Yaser Bishr de l'Université de Münster (Allemagne), du 23 au 27 novembre,
- Mickael Worboys de l'Université de Keele (Grande-Bretagne), du 24 au 27 novembre.

## B. Quelques actions marquantes

### B.1 Extraction des ronds-points dans les images aériennes : modélisation et stratégie

Nicolas Boichis

#### Contexte de l'étude

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une thèse commencée en décembre 1996 sur l'extraction automatique de carrefours dans les images aériennes à moyenne échelle (environ cinquante centimètres de résolution). Le but est d'extraire des objets compatibles avec la BD Topo, avec une précision métrique. L'analyse et l'interprétation de ces images nécessitent la mise en place d'un raisonnement complexe dû en partie à la complexité des objets à extraire.

On utilisera donc une base de données externe (la BD Carto de l'IGN) fournissant la forme globale du carrefour (géométrie des branches et topologie). La résolution de cette base de données est de l'ordre de dix mètres et une information sémantique complètera la description géométrique.

Ces données sémantiques nous renseignent sur la présence d'axes de route principaux et de formes caractéristiques à trouver dans le carrefour. On ne remettra pas en cause, en général, l'information fournie par la base, excepté dans le cas des carrefours simples pour lesquels il subsiste une ambiguïté avec les ronds-points de petites dimensions (exemple sur la figure B.1.1).

On ne cherchera pas non plus à mettre à jour la base de données externe étant donné la différence de résolution entre les deux bases. Dès lors, une approche descendante (guidée par les données) a été envisagée. Le système devra recalculer et compléter, le cas échéant à l'aide d'extraction de primitives images, le modèle issu de la base de données externe.

Enfin, ce système devra proposer un carrefour vérifiant les spécifications de la base de données topographiques (BD Topo) de l'IGN de précision métrique. L'exemple des ronds-points doit montrer la nécessité de proposer une modélisation et une approche dédiée aux carrefours. Différentes modélisations de ronds-points seront développées et la stratégie basée sur une approche descendante sera détaillée. Pour finir, quelques résultats seront présentés.

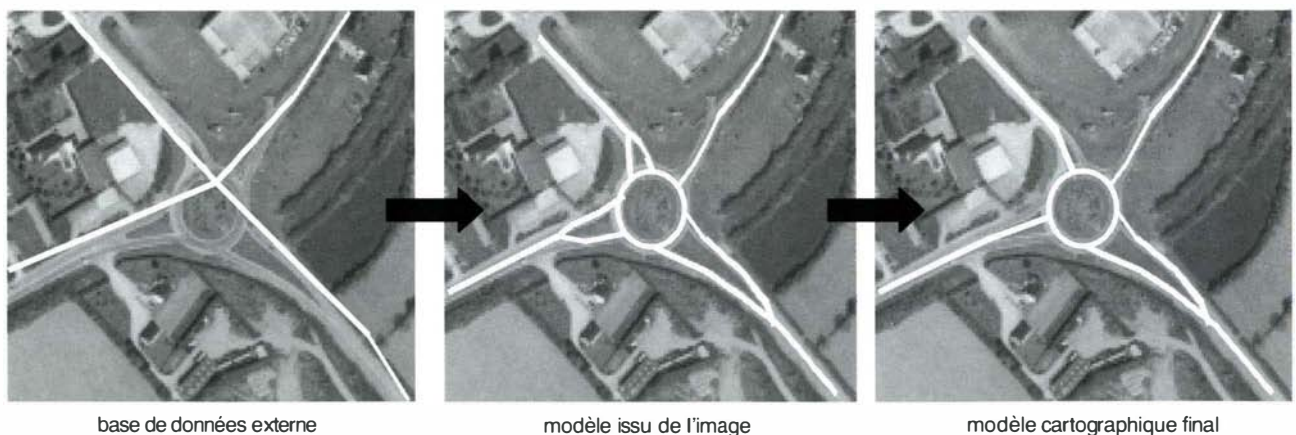


figure B.1.1 : enchaînement des principales étapes du processus d'extraction

#### Les différents modèles utilisés

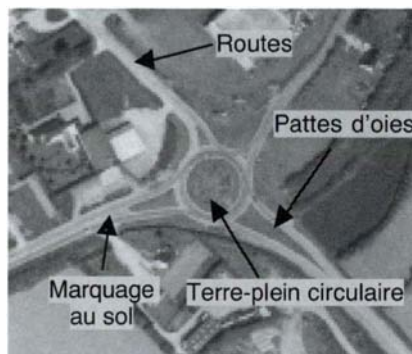
##### L'objet rond-point dans l'image

Les carrefours à sens giratoire (rond-point) sont les carrefours qui offrent d'après le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) le meilleur niveau de sécurité. D'après ce service, la moyenne annuelle des accidents survenus dans un rond-point est quatre fois plus faible que dans un carrefour-plan classique (en 1998 pour 10 000 véhicules/jour : 0,15 accidents dans un rond-point contre 0,6 pour un carrefour-plan).

Pour éviter que le niveau de sécurité d'un carrefour giratoire ne soit dégradé, il doit respecter des normes très strictes et très précises de construction. Les ronds-points sont donc des objets relativement normalisés et la connaissance de ces spécifications va nous servir à élaborer le modèle issu de l'image. Ces normes de construction nous informent sur les tailles minimum et maximum des différents objets et des relations possibles entre ces objets.

Cette modélisation dépend bien aussi du support image utilisé. Les images sont issues de clichés pris à l'échelle 1 : 30 000 et scannés avec un pas de quinze microns nous fournissant des images à une résolution au sol de 0,45 m. Le type d'image utilisé est l'ortho-image afin de s'abstraire des déformations dues au relief et des défauts de verticalité de la prise de vue (aplatissement des cercles sur les bords d'image).

À cette résolution, un rond-point est composé (voir figure B.1.2) d'objets spécifiques comme le terre-plein circulaire et d'objets communs aux autres carrefours comme les routes, les pattes d'oies et les marquages au sol.



*figure B.1.2 : les objets présents dans un rond-point*

Afin de bien modéliser le rond-point, il est nécessaire d'analyser l'importance des différents objets le composant. On peut les classer en fonction de leur stabilité en forme, en texture et en contraste. Le terre-plein circulaire, dans la plupart des cas, est effectivement de forme ronde.

Sa texture est rarement homogène à cause des multiples décorations présentes au centre du terre-plein. Les routes sont considérées dans cette étude comme les voies de communication donc comme des objets à bords parallèles et relativement homogènes.

La mise en place d'un rond-point à la place d'un carrefour plan est bien souvent synonyme de fort trafic. De ce fait, la présence de marquage au sol, de voitures isolées ou en file ininterrompue perturbe l'homogénéité des voies.

Enfin, les pattes d'oies sont des formes fréquentes sur les routes à double accès (entrée et sortie). Elles sont dépendantes de la largeur de la route et de la taille du terre-plein circulaire. Sur les figures B.1.2 et B.1.3, la présence de sept formes de pattes d'oies différentes par leur longueur, leur largeur et leur courbure nous indique la complexité de cet objet.

Pour l'ensemble des objets de ce rond-point, des contraintes liées à la qualité de l'image et de la représentation de l'objet dans l'image doivent être considérées dans la définition de ce modèle. Le contraste d'une route, par exemple, est lié à l'entretien du marquage au sol au centre et sur les bords de la route. La présence de végétation sur les bords peut dans certains cas réduire la netteté du bord voire l'occulter.

Dans le cas de capteur passif, la date de prise de vue est un paramètre fondamental pour qualifier le contraste et l'intensité lumineuse de la scène (un même rond-point photographié à la même heure en juin ou en décembre ne sera pas aussi bien contrasté).

Enfin, le scannage d'un cliché argentique introduit un bruit dans l'image pouvant altérer la netteté du bord. Ces contraintes images nous ont permis de définir la limite inférieure de précision et d'exhaustivité de notre modèle issu de l'image.

Des règles d'interdiction sont définies pour ne pas représenter une autoroute arrivant sur une route circulaire ou une nationale arrivant dans le rond-point sans patte d'oie. Des relations de prédiction dépendent de la dimension du terre-plein central, de la plus grande largeur de la route et la taille de la patte d'oie. Elles nous permettent de paramétrer les traitements, définir la taille des zones d'études et faciliter la reconstruction du carrefour.

Des objets peuvent être reliés par une relation de continuité géométrique (faible courbure), de séparation (une sortie sur une autoroute), une relation de projection d'une route secondaire sur une route principale ou encore de parallélisme entre deux routes ou des voies.

Tous ces objets et relations entre objets nous permettent de proposer une représentation de la réalité image d'une façon très fidèle et exhaustive. Pour un cartographe, ce type de représentation n'est pas intéressant car beaucoup trop détaillé. Une phase de généralisation (simplification) de la représentation est donc nécessaire pour rendre notre base de données image plus " lisible ".

## Le rond-point pour un cartographe

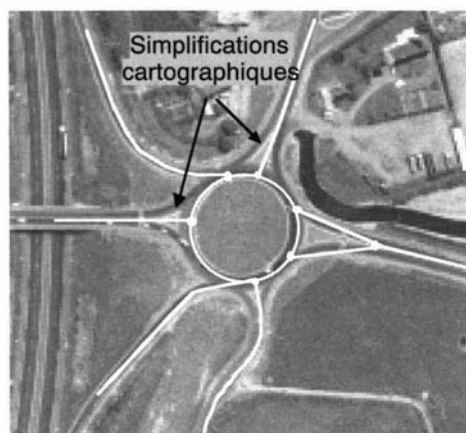
La cartographie au 1 : 25 000 est actuellement produite à partir de la BD Topo. Cette base de données est issue d'un processus de saisie manuelle de stéréo-restitution. L'opérateur travaille selon des spécifications de saisie très précises qui définissent le niveau de détail et la précision de la base de données à produire.

Le passage entre le modèle image et le modèle cartographique dépend donc d'un ensemble de règles de simplification. On montre sur la figure B.1.4, une simplification possible du modèle image. On constate que certaines pattes d'oie ont été supprimées et que l'on a fusionné certains nœuds. Cet exemple de généralisation ne montre qu'une partie des règles à prendre en compte.

La dimension du terre-plein central, la distance entre deux nœuds ou le type de projection à envisager (orthogonale, dans l'alignement ou au nœud le plus proche) sont autant d'autres règles qui démontrent que ce problème de généralisation doit être traité à part entière.



*figure B.1.3 : saisie manuelle du modèle de rond-point issu de l'image*



*figure B.1.4 : saisie manuelle du modèle cartographique de rond-point*

## Comment utiliser une base de données externe ?

Le laboratoire MATIS étudie donc quel pourrait être l'apport d'une base de données externe pour faciliter l'extraction de formes complexes telles que les carrefours. Le choix de la base de données s'est porté sur la base de données cartographique (BD Carto) de l'IGN. Son utilisation est relativement simple, accessible à tous et disponible sur toute la France.

L'utilisation de cette base nous permet de bénéficier des différentes corrections, mises à jour et densification des données. Elle a été conçue pour recueillir et gérer les informations géographiques nécessaires à la rédaction des cartes de l'IGN au 1 : 100 000 et aux échelles dérivées jusqu'au 1 : 500 000. On ne s'intéressera qu'au contenu géographique et en particulier au thème du réseau routier.

Ce thème est composé de données géométriques (arcs et nœuds) et sémantiques (attributs sur les nœuds et les arcs) enrichissant la description de l'information à traiter. Telle quelle, l'information sémantique n'est pas réellement utile mais la combinaison de ces données entre elles peut nous fournir une connaissance plus riche sur la nature et la composition du carrefour. Par exemple, on introduit un concept d'axe principal caractérisant le caractère prioritaire d'une route par rapport à une autre.

Cette idée nous permet de faciliter la reconstruction du carrefour et peut dans certains ronds-points influencer la phase d'extraction de formes. De plus, la connaissance du classement administratif de la route (départementale, nationale...) nous permet de paramétrer certains traitements spécifiques à l'extraction de route.

Un système à base de règles se charge de collecter l'ensemble des connaissances sémantiques et géométriques. L'écriture des règles doit être faite manuellement et, pour chaque carrefour, le système recherche dans sa base la classe auquel il doit appartenir (carrefours simples, carrefours complexes, ronds-points ou échangeurs autoroutiers). Les ronds-points de très grande taille peuvent ainsi être proposés par le système comme un objet.

Par contre, la différence de résolution entre la BD Carto et l'image, nous laisse penser qu'un grand nombre de ronds-points de plus petite taille peuvent exister dans l'image et ne pas être proposé par le système. La mise en place d'un détecteur de rond-point s'avère donc indispensable pour vérifier la cohérence de l'information proposée.

## Conclusions sur les modèles de rond-point

Trois types de modèles ont été définis pour tenter de répondre au problème complexe de l'analyse de l'image guidée par une base de données. On a montré que l'utilisation d'une base de données ne se limitait pas à une simple transcription d'informations en vue d'être intégrées par le système.

L'analyse au préalable de ces données géométriques et surtout sémantiques nous apporte de nouvelles connaissances sur la nature des objets et des relations entre ces objets.

La mise en place de ce modèle issu de la BD Carto nous permettra par la suite de simplifier considérablement l'analyse de l'image et fixera les bases du modèle issu de l'image. Le système cherchera dans l'image l'information nécessaire pour proposer un carrefour précis en terme de localisation et possédant toute l'information nécessaire à l'élaboration d'un modèle simplifié respectant les contraintes de la cartographie.

Le niveau de détail et d'exhaustivité de l'information image à rechercher, dépend des spécifications de construction, et des limites de détectabilité imposées par la précision des images utilisées. Les relations de successions entre les différents objets de ce modèle issu de l'image nous permettront d'optimiser la recherche des objets potentiellement présents dans l'image et de simplifier la phase de reconstruction du carrefour.

## La stratégie d'interprétation

Le système d'extraction de rond-point considère l'existence d'un détecteur de formes circulaires. Ce détecteur nous permet de ne travailler que sur des ortho-images de rond-point (figure B.1.9.1). L'*extraction des formes circulaires* (figure B.1.9.2) nous permettra d'extraire tous les cercles concentriques caractérisant les bords de régions théoriquement homogènes (objet route). L'extraction du terre-plein central et de la chaussée circulaire peuvent donc être traités simultanément.

Cette extraction nous permettra de recalculer le centre du carrefour (figure B.1.9.3), d'excentrer la recherche des routes (figures B.1.9.4 à B.1.9.6) et des pattes d'oies (figures B.1.9.8 à B.1.9.10) au-delà du bord extérieur de la chaussée circulaire. Dès lors, chaque branche proposée par la BD Carto sera étudiée séparément. Une *extraction de ruban rectiligne et homogène* doit nous permettre de proposer une liste d'hypothèses de routes attribuées et ainsi recalculer la branche BD Carto.

Pour finir, l'*analyse de la zone intermédiaire (patte d'oie)* doit nous permettre d'estimer la divergence de la route à l'entrée du carrefour et d'extraire la (les) route(s) présente(s). Une phase de reconstruction finale (figure B.1.9.11) se base sur des règles de continuité géométrique et radiométrique de la route. La meilleure hypothèse de rond-point est finalement retenue. Les trois tâches doivent être exécutées séquentiellement et dans cet ordre pour réduire le plus possible après chaque traitement la zone de l'image à analyser.

## Extraction de la route circulaire

L'état de l'art sur l'extraction de formes circulaires dans une image est vaste. On arrive cependant à définir deux approches distinctes : si le but est d'estimer les paramètres avec précision en considérant tout le contour de la forme alors les méthodes sont basées sur la minimisation d'un critère, par contre, si l'application concerne un problème de vision par ordinateur, les méthodes sont issues d'une modification de la transformée de Hough [HOUGH 62].

### Estimation des paramètres

Deux types d'approches basées sur la minimisation d'un critère existent :

- estimation globale des paramètres en utilisant le critère des moindres carrés pour minimiser soit l'aire estimée [THOMAS, CHAN 89], soit une fonction d'erreur en moyenne quadratique modifiée [TAKIYAMA, ONO 89],
- algorithme en ligne d'estimation des paramètres : l'approche de [LANDAU 87] estime le centre et le rayon d'un arc de cercle pour une méthode itérative utilisant le critère des moindres carrés pour minimiser l'erreur entre un ensemble de points et l'arc estimé. L'approche de [PRAKASH 88] intègre, en plus, une contrainte appliquée à la fonction de minimisation des erreurs.

Ce type de technique présente l'avantage de travailler sur des arcs de cercles et prend donc en compte la fragmentation possible d'un cercle. Il semble cependant que chacune de ces méthodes possède une limitation quant au rayon minimum de détection. De plus, nous sommes dans l'impossibilité d'initialiser le processus puisqu'il faudrait fournir un point dans le cercle pour garantir la convergence de ce type d'approche, or, nous ne détenons pas cette information.

### Identification des paramètres par transformée de Hough

La plupart des auteurs font référence à la transformée de [HOUGH 62] dans les cas où les méthodes paramétriques classiques échouent. Le principe de cette méthode est de trouver dans un ensemble de points la présence de courbes paramétriques par un processus d'accumulation dans l'espace des paramètres.

À l'origine destinée à détecter des alignements, [DUDA, HART 72] et [KIMME et al 75] ont été les premiers à l'étendre à la recherche d'autres courbes paramétriques, comme les cercles. C'est une technique robuste mais qui est limitée par sa rapidité d'exécution et par l'utilisation excessive de mémoire.

Il semble donc primordial de réduire l'ensemble des points de l'image en ne prenant en compte que les points de contours [YUEN et al 90] et [DAVIES 88].

Le principe de cette transformation dépend de la courbe recherchée. Un cercle est une courbe paramétrée définie

par l'équation  $(x - a)^2 + (y - b)^2 + r^2$ , donc un, et un seul cercle est défini par les trois paramètres (a,b,r), les coordonnées de son centre et son rayon.

L'espace des paramètres obtenu est donc à trois dimensions. Pour un triplet de points donné dans l'espace image, on fait donc correspondre un point de l'espace des paramètres. En faisant de même pour chaque triplet de points de l'espace image, on obtient ainsi dans l'espace des paramètres des nuages de points correspondant chacun à un cercle bien précis (a,b,r). Il reste alors à quantifier l'espace d'accumulation, c'est-à-dire isoler les nuages de points.

**Méthode utilisée**

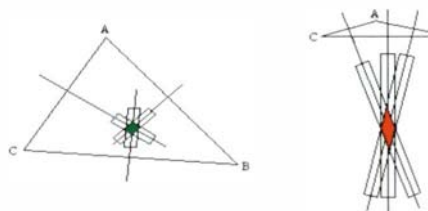
La méthode utilisée pour notre problème est détaillée dans [MASCARENHAS, BOICHIS 98]. Le principe se base sur la séparation de l'accumulation des centres et des rayons. Pour chaque centre significatif, on accumule dans l'espace des rayons et on conserve les maxima locaux caractéristiques. On impose de plus que les triplets appartiennent à la même chaîne de contour pour réduire le temps de calcul et augmenter l'accumulation des chaînes les plus longues.

Une fonction de répartition (figure B.1.5) redistribue l'accumulation d'un triplet de points introduisant l'incertitude sur la localisation du centre.

De ce fait, la valeur même de l'accumulation n'a plus vraiment de signification. La quantification de l'espace de Hough est faite par moyennes successives puis filtrage des maxima locaux. De plus, un processus d'auto-évaluation dans l'image de contours nous permet de filtrer les hypothèses qui auraient été issues de chaînes trop petites, trop plates ou mal contrastées.

Quatre critères sont considérés pour " auto-évaluer " un cercle :

- la confiance : pourcentage de points du cercle situés à proximité d'un point de contours et ayant un gradient radial,
- la proximité : distance en mètre séparant le centre du cercle à la position supposée du carrefour,
- le gradient : fonction floue appliquée à la somme absolue de la norme du gradient en chaque point du cercle,
- la distance aux contours : elle définit une qualité d'appariement. Elle se calcule en évaluant la plus grande des plus courtes distances de chaque point de l'échantillonnage du cercle K1 par rapport aux points de contours K2.



**figure B.1.5 : incertitude de localisation du centre du cercle**

Certaines aberrations sont corrigées, comme la présence de rayons trop petits ou trop grands, la présence de plusieurs rayons ou de plusieurs centres trop proches. L'ensemble des solutions restantes est donc trié et le meilleur centre est conservé. Une phase de groupement des bords circulaires concentriques est ensuite lancée pour proposer des hypothèses d'axe de routes circulaires vérifiant le modèle de ruban homogène.

Une évaluation a été menée sur un échantillon de quarante-deux ronds-points (tableau ci-dessous). La classification des résultats est faite à la main selon quatre classes possibles : pas de détection de centres, cercle trop petit, ambiguïté entre les routes circulaires et extraction parfaite.

**tableau B.1.1 : évaluation des solutions trouvées par l'algorithme d'extraction de routes circulaires**

Pas de détection de centres	Cercles trop petits ou trop grands	Ambiguïté entre routes circulaires	Extraction parfaite	Nombre total de ronds-points
9%	11%	14%	66%	42

Les problèmes de non-détection de centres sont dus au très mauvais contraste du terre-plein circulaire. De plus dans cinq cas, la présence de dessins à l'intérieur du terre-plein central nous empêche de sélectionner la bonne solution d'axe de route.

Dans les autres cas ambigus, le manque de contraste rend l'extraction du cercle extérieur impossible. Pour finir, on constatera la fiabilité en terme d'exhaustivité de l'algorithme d'extraction de formes circulaires puisque dans 91% l'extraction a donné satisfaction (9% de non détection de centres).

## Extraction des routes linéaires

L'extraction des routes linéaires développée dans [BOICHIS et al 98], cherche en fait à recaler la branche de la BD Carto dans l'image. La méthode proposée suppose une linéarité de la route sur une distance de quelques dizaines de mètres.

La recherche de la direction générale dans l'image des contours doit nous permettre de replacer localement la branche. La méthode mise en place pour cette extraction de ruban rectiligne homogène se base sur la transformée de Hough (TH). On se place dans un espace de paramètres en coordonnées polaires  $(\rho, \theta)$  où  $\rho$  est la distance de l'origine à la droite et  $\theta$  l'angle créé entre la droite et la verticale du repère.

La droite est repérée par son équation :  $x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta = \rho$ .

Deux points seulement sont nécessaires pour matérialiser une droite et à chaque couple correspond une accumulation dans la cellule  $(\rho, \theta)$ . La quantification de l'espace de Hough est faite de la même façon que pour les images d'accumulations dans l'espace des cercles.

Sur l'exemple de la figure B.1.6, on présente le principe de la transformée de Hough. On place le centre du repère au centre de l'image pour atténuer les effets de bords. L'image d'accumulation résultante montre clairement que de multiples maxima locaux sont présents autour de 5 et 185 degrés.

On peut donc en déduire les droites matérialisant les bords contrastés. Un groupement des bords parallèles et un processus d'auto-évaluation géométrique et radiométrique des solutions d'axe de routes sont effectués pour classer ces hypothèses.

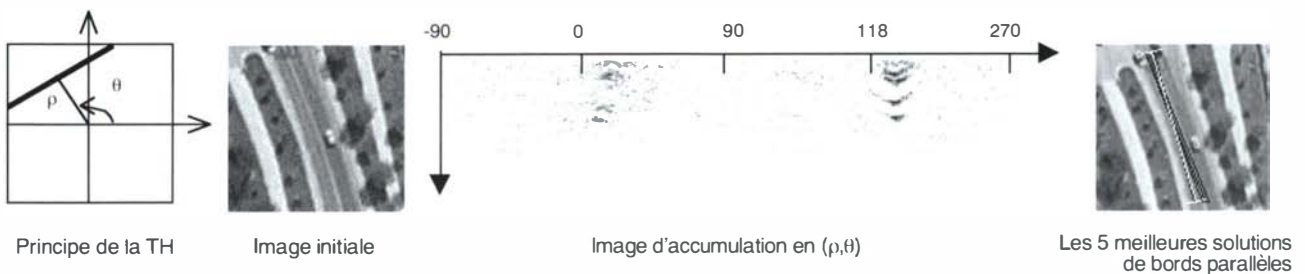


figure B.1.6 : exemple d'accumulation de Hough dans l'espace des droites

Les mesures utilisées pour l'auto-évaluation tiennent compte des imprécisions géométriques et de la mauvaise qualité radiométrique de l'image. Des fonctions floues sont définies pour évaluer la probabilité pour une hypothèse d'être un bord de route linéaire, continu, long et contrasté. Ces auto-évaluations sont utilisées pour mettre en place un mécanisme de décision complexe dans les cas où l'extraction aurait échoué (présence d'ombres portées, masquages, mauvais positionnement de l'image...).

Différentes actions peuvent dès lors être proposées :

- un déplacement de la zone d'analyse,
- un élargissement de cette zone,
- le changement du paramétrage,
- la remise à zéro de certains seuils.

Dans l'exemple présenté en figure B.1.7, on constate que le positionnement initial de l'extracteur de route linéaire est mal placé. Le système ne trouvant pas d'hypothèses acceptables va diagnostiquer un déplacement dans le sens de la branche de la BD Carto.

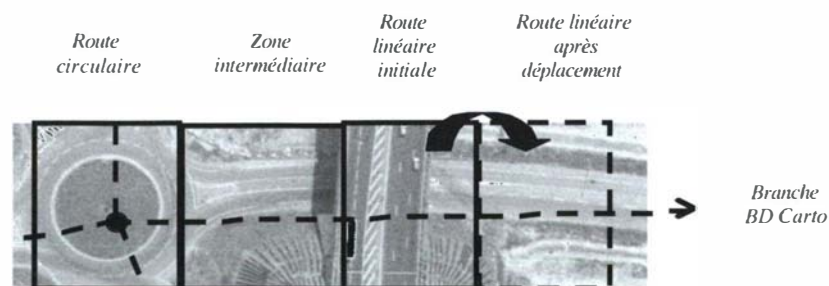


figure B.1.7 : exemple de déplacement du mécanisme de décision



Les critères intervenant pour le déplacement sont liés au parallélisme des bords (l'un des bords est masqué), à la longueur de l'hypothèse (majeure partie de la route masquée) ou encore à une forte délocalisation de la BD Carto entraînant l'analyse d'une zone vide.

Quelques évaluations (tableau B.1.2) nous ont permis de constater que cette extraction n'était pas fiable puisque 60% de routes ont été bien extraites (échantillon de cent dix routes des quarante-deux ronds-points). L'acceptation d'une hypothèse est déterminée par notre propre jugement de cartographe qui reviendrait à exiger une précision inférieure au pixel. Dans les 40% de refus, on constate que la grande majorité est liée à l'inadéquation du modèle linéaire. On constate ensuite que ce sont surtout des problèmes dus au contexte (ombres portées ou voitures en particulier).

**tableau B.1.2** : évaluation de l'ensemble des problèmes rencontrés dans l'extraction de routes linéaires

Parallélisme	Modèle linéaire mal adapté	Contraste trop faible	Masquage ou ombres portées	Erreurs locales plus grandes de la BD Carto
3,4%	22%	2,3%	5,7%	8,6%

## Extraction des pattes d'oies

Ce traitement a pour but de séparer les cas d'évasement prononcé synonyme de séparation des voies de communications à l'entrée du carrefour, des cas de parallélisme. Sur la figure B.1.8a, on considère que la représentation image de la route doit être simple, donc sans séparation des voies.

Dans le cas B.1.8b (voir page suivante), la divergence des deux bords de routes est relativement forte et la séparation des voies très bien marquée. Cette idée de divergence géométrique est complétée par une idée de symétrie globale de l'image, par rapport à la ligne médiane entre des deux bords extérieurs.

La *divergence géométrique* des deux bords est en fait matérialisée par la divergence des deux axes de routes. On applique donc sur ces deux images un algorithme de détection de lignes courbes parallèles [SANCHEZ, GUIGUES 98].

Cet algorithme est basé sur la notion physique de propagation des rayons lumineux dans une fibre optique. On considère que l'image des maxima locaux du gradient correspond à des milieux d'indice de réfraction différents. Une émission de rayons est simulée et un processus d'accumulation nous permet après seuillage de proposer une liste d'hypothèses d'axe de ruban homogène.

Une fois la détection des hypothèses de routes effectuée, on cherche pour chaque couple d'hypothèses à caractériser la divergence des deux polygones. Pour ce faire, la polygone médiane entre chaque couple d'axes de routes est calculée par une opération morphologique.

La fonction de distribution des distances aux axes de routes, le long de cette polygone peut ensuite être déterminée. Ces opérations sont effectuées pour chaque couple et on applique un modèle de deux droites pour représenter cette fonction (figure B.1.8c).

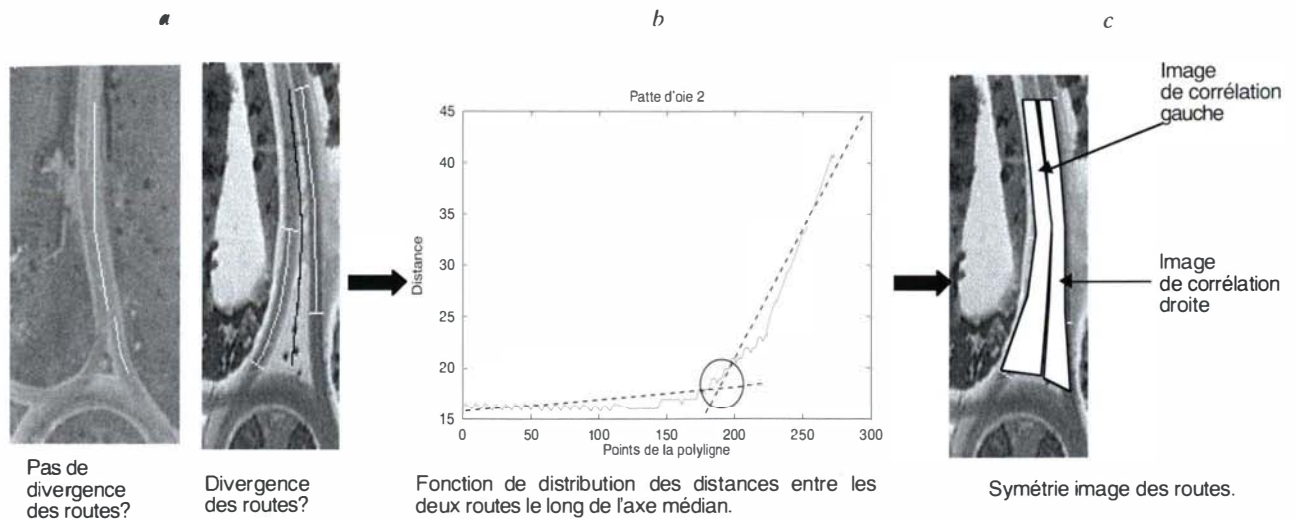
L'objectif de cette modélisation est de considérer que, dans le cas d'une divergence progressive, ces deux droites seront presque alignées et de pente non nulle. Dans le cas d'une divergence soutenue (figure B.1.8b), l'angle entre ces deux droites nous informera de l'importance de cette divergence et, enfin, dans le cas d'un parallélisme (figure B.1.8a), ces deux droites seront alignées et de pente presque nulle.

Dans le cas d'un couple d'hypothèses divergentes, il est nécessaire de compléter cette information géométrique avec une information de *symétrie image*. Cette idée de symétrie radiométrique par rapport à l'axe médian est très souvent respectée. L'objectif de cette mesure est d'éviter de considérer la divergence d'un fossé avec un axe de route.

Par contre, la divergence de deux fossés symétriques par rapport à l'axe médian doit être considérée. La mesure est basée sur la corrélation globale entre les images délimitées par l'axe médian, d'un côté, et les axes de route, de l'autre. Une mesure globale peut être sensible à de petites différences locales telles qu'une voiture ou une ombre portée sur une des routes.

Une première évaluation des résultats a montré que sur les cent dix routes des quarante-deux ronds-points, 100% des images de routes non-divergentes (18) ont pu être détectées.

De plus, 50% des images de séparateurs (92) ont été reconstruites. Les mauvais résultats obtenus pour ce détecteur sont, pour une grande partie, dus à la qualité des images et à la robustesse de la mesure de symétrie image. La présence de files de voitures, d'ombres portées ou de masquages perturbent la mesure de corrélation ou l'extraction même de l'axe de route.



**figure B.1.8 : définition de la divergence entre deux routes**

## Filtrage des hypothèses par groupement avant reconstruction

Chaque traitement effectué auparavant propose une liste de solutions attribuées. Dans certaines configurations, la séparation entre la route et un objet ressemblant peut s'avérer impossible localement. La meilleure solution locale n'est donc pas dans tous les cas la meilleure représentation de la route. Dans le cas de la figure B.1.5, la meilleure hypothèse de route est décalée sur une des voies.

Le recentrage de cette hypothèse ne peut se faire que lors de la reconstruction du carrefour, donc du groupement avec l'information présente au niveau de la patte d'oie. On constate effectivement sur la figure B.1.7 que la route2 est recentrée sur l'axe de la chaussée.

Ce groupement entre les hypothèses de routes linéaires et les pattes d'oies introduit des contraintes géométriques (faible courbure, alignement, conservation de largeur). Les contraintes radiométriques sont considérées comme peu stables.

Effectivement, sur les trois exemples de la figure B.1.9 (images 8, 9 et 10), deux seulement pourraient vérifier une continuité radiométrique entre les voies de la patte d'oie et l'une des routes linéaires. Dans le troisième cas, la présence de marquages au sol et de "zébra" perturbe trop la mesure radiométrique prise sous l'axe.

L'autre groupement à effectuer considère le résultat des hypothèses de routes circulaires et de pattes d'oies. La continuité entre ces deux listes pose beaucoup moins de problèmes géométriques et une continuité radiométrique peut être considérée. L'ambiguïté entre ces différents objets est bien moins forte du fait de l'originalité des formes que l'on a eu à détecter au préalable. Les contraintes géométriques pourront donc être plus sévères.

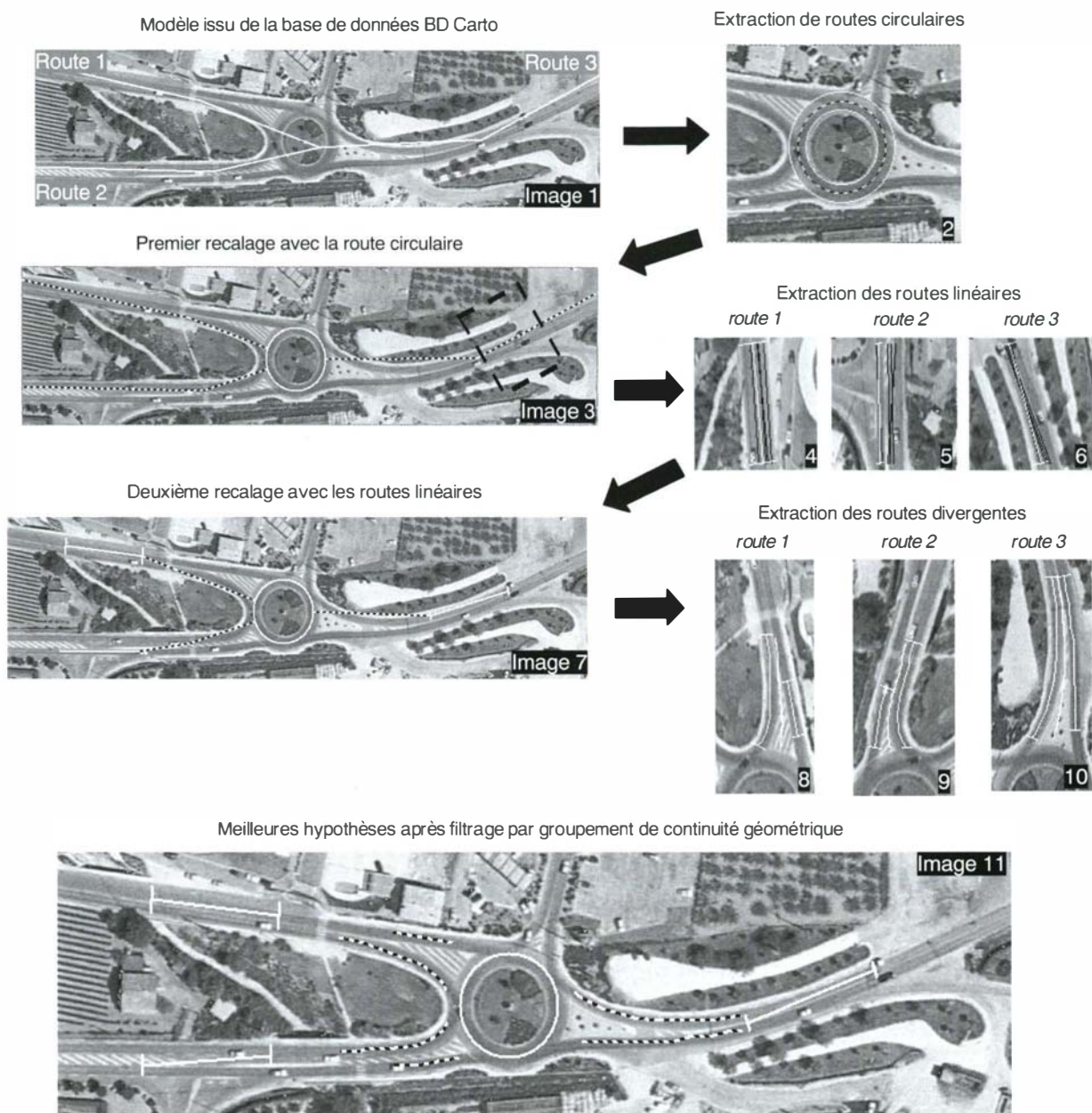
## Perspectives

La méthode actuellement implémentée doit être définitivement achevée avec la reconstruction finale du rond-point. Les aspects projections des pattes d'oies sur les routes circulaires n'ont pas encore été considérés. Ces jonctions semblent relativement normalisées et une simple extrapolation des pattes d'oies devrait couper la route circulaire créant ainsi un nœud du rond-point.

La reconstruction entre les pattes d'oies et les routes linéaires devraient poser un peu plus de problèmes. Il faut en effet considérer que les hypothèses de patte d'oie sont de longueur variable. Une extrapolation dans la direction tangente devrait nous satisfaire dans un premier temps étant donné la longueur de la zone intermédiaire. La position du nœud de jonction entre les deux hypothèses de pattes d'oies et la route linéaire sélectionnée sera le barycentre des intersections.

Il est apparu que le calcul de symétrie radiométrique par calcul de corrélation global était relativement sensible à la présence de voitures ou d'ombres portées. Il faudrait raffiner ce calcul en cherchant le long de l'axe médian les maxima de corrélation obtenus sur des vignettes de taille fixe. Cette méthode devrait nous permettre de ne considérer que les zones de forte corrélation et nous éviter de chercher à corréler des zones de textures très différentes.

Enfin, une évaluation automatique par rapport à une référence saisie manuellement devra être mise en place pour un plus grand nombre de ronds-points. La comparaison avec la BD Topo pourrait être envisageable mais pour cela il faudrait implémenter une fonction de passage avec le modèle de rond-point issu de l'image. Cette fonction reste relativement complexe à mettre en place car elle doit considérer l'intervention de l'opérateur humain et les spécifications de saisie.



**figure B.1.9** : enchaînement complet des traitements. Modification du modèle issu de la BD Carto et recalage des objets extraits de l'image (cercles, pattes d'oies).

## Références

- [BORDES 97] Ghislaine Bordes : *Interprétation d'images aériennes guidées par une base de données cartographiques : application à l'extraction automatique des routes*, thèse de doctorat de l'université de Marne-La-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 970001/C-THE, 1997.
- [DAVIES 88] Davies, E.R. : *A Modified Hough Scheme for General Circle Location*, in Pattern Recognition Letters, 7 : 37-43, 1988.
- [DUDA, HART 72] Duda, R.O. & Hart, P.E. : *Use of the Hough Transform to Detect Lines and Curves in Pictures*, Communications ACM, 15(1) : 11-15, 1972.
- [HOUGH 62] Hough, P.V.C. : *Method and Means for Recognizing Complex Pattern*, US Patent, (3069654), 1962.
- [KIMME et al 75] Kimme, C., Ballard, D.H. and Slansky, J. : *Finding Circles by an Array of Accumulators*, CACM, 18(2) :120-122, 1975.
- [LANDAU 87] Landau, U.M. : *Estimation of a Circular Arc Center and Its Radius*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 38 (3) : 317-326, 1987.
- [PRAKASH 88] Prakash, A. : *Circle Parameter Estimation from Partial Arcs*, In Intelligent Robots and Computer Vision, 1002 : 99-106, 1988.
- [SANCHEZ, GUIGUES 98] M. Sanchez & L. Guigues : *Étude d'un algorithme de propagation de rayons pour la reconnaissance de routes*, rapport de stage du laboratoire MATIS, IGN-SR 970039/C-STA, 1998.

[TAKIYAM, ONO 89] Takiyama, R. & Ono, N. : *A Least Square Error Estimation of the Center and Radius of Concentric Arcs*, in *Pattern Recognition Letters*, 10 : 237-242, 1989.

[THOMAS, CHAN 89] Thomas, S.M. & Chan, Y.T. : *A simple approach for the estimation of circular arc center and its radius*, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 45 (3) : 362-370, 1989.

[YUEN et al 90] Yuen, H.K., Princen, J., Illingworth, J. & Kittler, J. : *Comparative Study of Hough Transform Methods for Circle Detection*, in *Pattern Recognition Letters*, 11 (5) : 331-338, 1990.

## **Publications**

[BOICHIS et al 98] N. Boichis, J.-P. Cocquerez & S. Airault : *A Top Down Strategy for Simple Crossroads Automatic Extraction*, in *Proceeding of the ISPRS Commission II Symposium*, 32 (2) : 19-26, laboratoire MATIS, IGN-SR 980017/C-COM, 1998.

[BOICHIS et al 99] N. Boichis, J.-P. Cocquerez & S. Airault: *Road Intersection Automatic Extraction from Aerial Images : Application to the roundabout*, ICCV'99, en soumission, laboratoire MATIS, IGN-SR 990017/C-COM, 1999.

[MASCARENHAS, BOICHIS 98] E. Mascarenhas & N. Boichis : *Modélisation et extraction automatique des ronds-points dans les images aériennes*, rapport de stage du laboratoire MATIS, IGN-SR 980014/C-STA, 1998.

## B.2 Calcul automatique de points de liaison pour la caméra numérique

Didier Boldo, Frank Fuchs, Franck Jung et Yann Wehrstedt

Ces travaux réalisés courant 1998 sont une collaboration entre Didier Boldo, Frank Fuchs, Franck Jung, Cécile Oudine, stagiaire, Désiré Rajaonarison, stagiaire et Yann Wehrstedt. Ils ont fait l'objet d'une présentation partielle le 13 octobre 1998. L'appui technique du projet Ortho a permis les premiers tests en vraie grandeur.

### Contexte et objectifs

Les prises de vues avec la caméra numérique générant beaucoup plus d'images pour une même couverture à résolution identique que les images argentiques, la saisie manuelle des points de liaison en vue de l'aérotriangulation se trouve pénalisée. Aussi, l'étude d'une identification automatique des points de liaison s'avérait nécessaire. Après un rapide tour d'horizon des solutions existantes et l'essai du logiciel PHODIS, les spécificités de la caméra numérique ont conduit à mener la présente étude, d'autant que la qualité du signal de la caméra numérique permettait d'espérer une bonne identification automatique des points de liaison.

L'étude se décompose en quatre parties. La première est la constitution automatique du tableau d'assemblage de la mission. La seconde est le calcul des points de liaison proprement dit. La troisième partie est un filtrage permettant d'éliminer des erreurs et de limiter le nombre de points de liaison. Enfin, la validation par calcul d'aérotriangulation des algorithmes présentés dans cette étude fait l'objet de la dernière partie.

La méthode a été testée sur un chantier de mille images pris sur la ville de Rennes en imagerie couleur, avec une résolution de trente centimètres.

### Constitution automatique de tableau d'assemblage

Frank Fuchs

L'objectif de la constitution d'un tableau d'assemblage est ici de calculer une information de position et d'orientation 2-D des images de la mission, permettant de placer toutes ces images dans un même repère du plan, de telle sorte que les détails homologues de plusieurs images se trouvent à la même position dans ce repère commun. Pour deux images possédant un recouvrement, il est alors possible d'estimer un changement de repère permettant la prévision de la position d'un point homologue à un point  $p$  donné. Ainsi, le tableau d'assemblage, outre son utilité propre, sert de guide à la détection des points de liaison multiples. Les images sont traitées après un fort sous-échantillonnage, et un passage en niveaux de gris dans le cas d'images couleur.

Formellement, on considère un repère global au plan, commun à toutes les images. C'est le repère de bloc. Ce que l'on recherche est, pour chaque image  $I$ , une similitude  $s_i = R_i * T_i$  permettant le passage des coordonnées d'un point du plan  $(x_B, y_B)$  exprimées dans le repère de bloc, à sa position  $p(x, y)$  dans l'image.

Le problème est traité bande par bande, puis par un assemblage de bandes. Les techniques s'appuient sur la détection de points d'intérêt dans les images et sur le calcul de l'orientation relative 2-D d'un couple d'images dont la rotation relative est d'angle voisin de 0.

### Détection de points d'intérêt

Un point d'intérêt est un point de l'image autour duquel le signal présente des propriétés particulières, notamment celle de posséder des dérivées fortes dans plusieurs directions, ou au moins dans deux directions orthogonales. Dans le cas de recherche de points homologues, il est important que le détecteur de points d'intérêt utilisé possède la propriété de trouver le mieux possible dans les différentes images, les points correspondant aux mêmes détails physiques. Cette définition correspond à la notion de répétabilité. La répétabilité des détecteurs de points a été étudiée [SCHMID 96].

Le détecteur de Harris précis, [HARRIS 88], se montre le plus répétable. C'est donc ce détecteur qui est utilisé pour la détection des points, que ce soit pour le tableau d'assemblage en sous-échantillonné, ou pour le calcul des points de liaison eux-mêmes. Techniquement, [HARRIS 88] établit une mesure en chaque point de l'image, et les points retenus sont les maxima locaux (sur des fenêtres  $3 \times 3$ ) de cette mesure. La mesure utilise largement des lissages gaussiens et dérivations.

Cette partie de la méthode comporte deux paramètres : l'écart-type de la gaussienne utilisée pour les lissages et dérivations, et la taille de la fenêtre de calcul associée à ces traitements.

### Traitement d'un couple d'images d'orientation voisine

On suppose que les images possèdent une rotation relative d'angle voisin de 0, et qu'en raison du fort sous-échantillonnage, les disparités des points homologues de deux images sont toutes semblables.

Deux points homologues peuvent donc être mis en correspondance sans problème de rotation. Pour deux points d'intérêt  $P_i$  de l'image  $I$ , et  $Q_j$  de l'image  $J$ , on considère  $c_{ij}$  le coefficient de corrélation linéaire calculé sur une fenêtre carrée centrée sur chacun des points. Deux points  $P_i$  et  $Q_j$  sont jugés candidats homologues si pour  $P_i$  aucun autre point de  $J$  n'est plus ressemblant, et inversement. Formellement :

$$\forall j', c_{ij'} \leq c_{ij}$$

$$\forall i', c_{i'j} \leq c_{ij}$$

On obtient ainsi des couples de points candidats pour les images  $I$  et  $J$ . Dans la pratique, beaucoup d'aberrations sont présentes. On opère donc un filtrage dans l'espace des disparités. Pour deux points candidats homologues, on définit le vecteur de disparité reliant ces deux points. Il s'agit du vecteur obtenu par différence des coordonnées des points. En accumulant ces vecteurs de disparité dans un histogramme, on obtient un nuage correspondant aux points de disparités similaires. Ces points constituent les points homologues retenus par la méthode.

Dans la pratique, le nuage est identifié par une fermeture morphologique avec un élément structurant carré  $3 \times 3$ . Après la fermeture, la composante connexe de poids le plus fort est identifiée, puis les points participant à cette composante sont retenus. À ce stade, on définit la performance d'un couple d'images : il s'agit du rapport entre le nombre de points participant au nuage de points et le nombre de points candidats homologues.

À partir de ces points, on estime aux moindres carrés la similitude permettant au mieux de relier les deux repères des images. Ceci permet de "plonger" la seconde image dans le repère de la première.

Cette partie de la méthode comporte un seul paramètre concernant la corrélation : il s'agit de la taille de la fenêtre de calcul. La taille de l'élément structurant pour le filtrage est par ailleurs fixe.

La figure B.2.1 présente deux images voisines (taille :  $300 \times 200$ ) avec, en blanc, leurs points d'intérêt. Étant donné la densité des points, leur représentation est difficile, et l'étude visuelle des images doit être minutieuse. La figure B.2.2 présente les points mis en correspondance dans ces deux images.

Une étude attentive permet de voir que les appariements sont très souvent corrects. Il est significatif de constater que les points homologues se situent dans la zone de recouvrement des deux images. La figure B.2.3 présente deux extraits de ces images, permettant de voir en détail les points mis en correspondance dans une zone localisée des images.

## Traitement d'une bande

On suppose connaître les  $N$  images constituant une bande. Le traitement précédent est appliqué aux  $N-1$  couples successifs constituant une bande. On peut ainsi "plonger" toutes les images d'une bande dans le repère de la première image de cette bande. Toutes les bandes sont traitées indépendamment. Il n'y a aucun paramètre supplémentaire concernant cette étape.

## Traitement d'un bloc

On suppose connaître l'ordre des bandes. On suppose également que les bandes possèdent un recouvrement latéral significatif ( $> 10\%$ ). Cette partie de la méthode est réalisée itérativement : on colle la bande  $n + 1$  au bloc constitué des  $n$  bandes précédentes.

On considère donc que l'on dispose d'un bloc déjà constitué auquel on ajoute une bande supplémentaire. Ceci est réalisé en accrochant d'abord une image de la bande au bloc, puis en raccrochant les autres images de la bande, de proche en proche.

- Pour raccrocher une image de la bande au bloc : pour une image  $I$  de la bande, on considère temporairement tous les couples entre  $I$  et les images  $J$  de la dernière bande du bloc. On considère également les couples entre  $I$  et les images  $J$  ayant subi une rotation de  $\pi$ . Pour tous les couples formés, on effectue le traitement de couples d'images étudié plus haut, puis on retient le couple possédant la meilleure performance. Si cette performance n'est pas suffisante, on répète l'opération jusqu'à trouver un couple assez performant. On obtient ainsi un couple en une image  $I_0$  et  $J_0$  permettant de "plonger" l'image  $I_0$  dans le repère du bloc.
- De proche en proche, on plonge les images de la bande dans le repère du couple. Pour contrer les accumulations d'erreurs, une optimisation du système est effectuée à intervalles réguliers (toutes les  $n_{opt}$  images), par une méthode décrite dans la suite.

Cette partie de la méthode introduit deux paramètres. Le premier est le seuil de performance au delà duquel on accepte le couple d'images entre la bande et le bloc. Ce seuil est fixé à une valeur dont une étude précise a montré qu'il était tout à fait fiable. Le second est  $n_{opt} = 5$ . Cette valeur permet à la méthode d'être fiable tout en réduisant le nombre d'optimisations.

## Optimisation de bloc

Cette optimisation a pour but d'affiner les positions et orientation des images d'un bloc. Ceci est nécessaire car il n'est pas possible de "coller" de façon rigide deux bandes en raison de déformations qui s'accumulent lors de la constitution de tableau d'assemblage intra-bandes.

On considère tous les couples d'images possédant un recouvrement. Pour chaque couple, les points homologues au sens précédent sont calculés. Une fonction de coût visant à réaliser l'objectif du tableau d'assemblage est minimisée.

Techniquement cette fonction est la somme de fonctions de coût liée à chaque couple d'images. La fonction liée à un couple d'images vise elle-même à minimiser, pour chacun des points homologues du couple d'images, la distance des deux homologues dans le repère du tableau d'assemblage :

$$d(s_i^{-1}(P_i), s_j^{-1}(P_j))$$

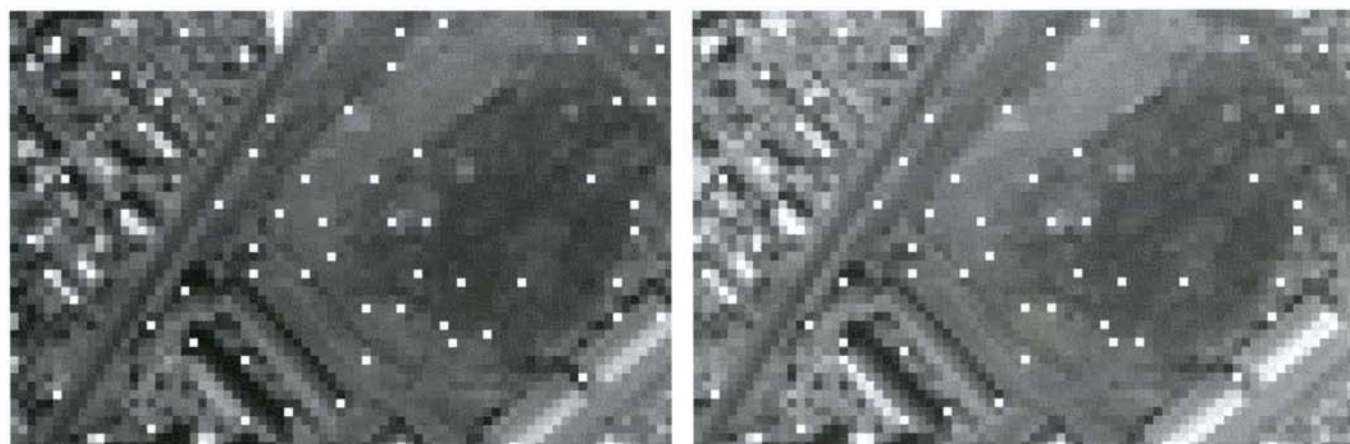
Cette fonction est ajustée pour ne pas tenir compte des points aberrants, mais son comportement global est celui décrit ci-dessus. Il n'est pas utile d'explicitier les détails de cette fonction de coût.



*figure B.2.1 : deux images 300 x 200 et leurs points d'intérêt*



*figure B.2.2 : résultat de mise en correspondance*



*figure B.2.3 : extrait des images avec les points homologues*

## Étude des paramètres pour la constitution du tableau d'assemblage

Le comportement des paramètres est connu. Il s'avère notamment que pour certains d'entre eux, les valeurs sont fixes dans le sens où des chantiers significatifs ont été traités sans devoir les remettre en cause.

Il s'agit de :

- la valeur de l'écart-type de la gaussienne dans le calcul des points d'intérêt, ainsi que la taille de la fenêtre de calcul associée,
- la taille de la fenêtre de corrélation pour le calcul des points candidats homologues,
- la taille de l'élément structurant utilisé dans le filtrage dans l'espace des disparités.

Pour les autres paramètres, leur comportement est connu : leur variation permet dans tous les cas d'augmenter la fiabilité au prix d'un temps calcul plus élevé, ou inversement. Dans ce sens, les paramètres ne sont pas sensibles car leur influence sur les résultats est connue.

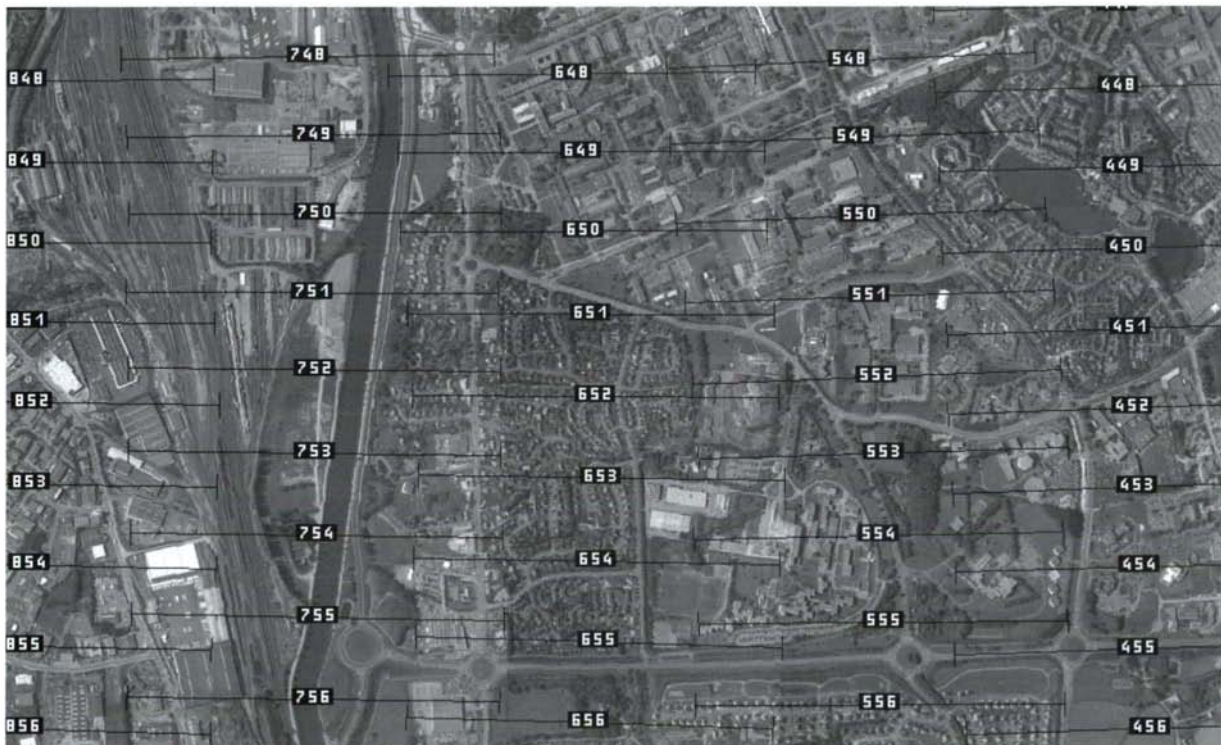
## Mise en œuvre

La méthode a été aménagée pour pouvoir être mise en œuvre sur des chantiers conséquents. Actuellement, seule la saisie d'un fichier décrivant le chantier est nécessaire.

La chaîne est alors complètement automatique, et aboutit à la donnée du tableau d'assemblage sous forme symbolique (donnée des similitudes 2-D associant les repère images et le repère du bloc), ainsi qu'à une mosaïque d'image. La méthode a été mise en œuvre sur des images de la caméra numérique, pour diverses missions (Le Mans : noir et blanc, couleur, Saumur : noir et blanc et Rennes : couleur).

Dans le cas de Saumur, seuls des paires de bandes successives ont pu être traitées en raison de recouvrements très faibles voire inexistantes entre bandes.

Le cas de Rennes a tenu place de test en grandeur réelle. Des tests sur images argentiques scannées ont été réalisés. La méthode est également adaptée à ce cas.



*figure B.2.4 : extrait du tableau d'assemblage pour la mission de Rennes*

Pour Rennes, un test récent a été mené. Voici les caractéristiques de ce test :

- 14 bandes de 60 à 65 images ont été traitées,
- le temps de saisie du fichier de données initial est inférieur à 30 minutes pour les 900 images,
- la machine utilisée est un PC bi-processeur, 450 MHz, 512 Mo de RAM. Mais les codes n'ont tourné que sur un processeur,
- le temps d'exécution total est de 24 heures,
- la RAM maximale nécessaire lors du calcul a été de 100 Mo.

La précision géométrique des raccords de la mosaïque résultante est bonne : les raccords se font généralement avec une erreur de un pixel, parfois deux, rarement au delà.



La précision est donc tout à fait suffisante pour permettre une recherche de points homologues en pleine échelle. Par contre, dans le cas de recouvrements trop faibles, il arrive que l'algorithme "décroche" une bande du bloc et que la cohérence soit perdue.

Ceci s'est produit dans un cas extrême sur la mission de Rennes, entre deux bandes ne possédant pas de recouvrement par endroit : la méthode ne peut pas toujours rattraper une absence complète de recouvrement. Une utilisation des algorithmes est donc plus sûre si les recouvrements se rapprochent des 10% souhaités pour son bon fonctionnement. La figure B.2.4 présente un extrait du tableau d'assemblage résultant des calculs.

## Conclusion sur la constitution de tableaux d'assemblage

La méthode ne nécessite que peu de pré-requis. Toutefois, on gagnerait à utiliser les informations liées aux données GPS, ceci permettrait peut-être d'étendre le système à des bandes transversales à la mission. Lors des tests effectués, la méthode s'est montrée fiable au-delà des spécifications requises (10% de recouvrement).

La fiabilité de la méthode repose sur la qualité du signal liée au sous-échantillonnage des images, le choix du détecteur de point qui assure leur répétabilité, la corrélation *croisée*, le filtrage dans l'espace des disparités, l'optimisation de bloc. Actuellement, des améliorations des codes sont envisagées au projet Ortho. Leur mise en œuvre est également entreprise à IGN Espace.

## Recherche automatique de points de liaison

Franck Jung

Le but de cette partie est la détermination de points de liaison multiples. Cette partie s'appuie sur la connaissance des recouvrements entre les différentes images de la mission. L'estimation des recouvrements entre images peut être effectuée en appliquant l'algorithme décrit dans la partie précédente ou bien en exploitant les données GPS de la mission.

Le choix des algorithmes de détection et de mise en correspondance de points d'intérêts conduit à un très grand nombre de points de liaisons comportant des fautes. La réduction du nombre de fautes va résulter du choix des points de liaison de multiplicité élevée (i.e. le point est vu dans un grand nombre d'images). Enfin, la cohérence photogrammétrique des points sera étudiée afin de procéder à un ultime filtrage.

## Détection des points d'intérêt

Les points d'intérêt sont calculés, comme pour le tableau d'assemblage, en utilisant le détecteur de Harris précis. Les paramètres de la méthode sont identiques à ceux mentionnés lors de la phase correspondante du calcul du tableau d'assemblage : l'écart-type de la gaussienne utilisée pour les lissages et dérivations, la taille de la fenêtre de calcul associée à ces traitements.

Afin de limiter la combinatoire lors de l'étape de mise en correspondance, nous limitons le nombre de points d'intérêt à une constante  $N_p$ . Ces points sont choisis selon deux critères : ils doivent être de forte variance et bien répartis dans l'image. On construit donc  $N_p$  dalles dans l'image, et pour chaque dalle, les  $N_p / N_d$  points de plus forte variance sont retenus. Les valeurs typiques sont  $N_p = 20\ 000$ ,  $N_d = 25$ .

## Mise en correspondance des points d'intérêt

Dans cette partie, nous étudions la recherche de points homologues pour un couple de clichés. L'étape de mise en correspondance de points d'intérêt suit la même stratégie que celle décrite pour le tableau d'assemblage. La connaissance d'une estimation de la disparité (grâce au tableau d'assemblage ou à des données externes tel que le GPS), nous permet de réduire l'espace de recherche à une fenêtre de taille fixe autour du point théorique.

Nous ne retenons que les couples de points homologues composés de points se reconnaissant mutuellement. Afin d'éliminer les couples ayant une disparité aberrante, seuls les couples de points se trouvant au sein du nuage principal de la carte des disparités sont retenus.

Étant donné que le nuage principal est souvent très étalé, il n'a pas été jugé satisfaisant de reprendre la méthode utilisée lors de la constitution du tableau d'assemblage (fermeture morphologique). Pour chaque point de l'espace des disparités, le nombre de voisins est déterminé dans un disque de taille fixe. La classification est faite sur une technique de nuées dynamiques travaillant sur l'histogramme des nombres de voisins.

Cette étape nécessite plusieurs paramètres dont la taille des fenêtres pour les recherches de points homologues. Cette taille est fortement dépendante du relief de la scène traitée (en cas de fort relief, il faudra l'augmenter). Dans nos applications nous avons pu traiter des zones ayant de faibles variations de relief avec des fenêtres de taille 300 x 300. Dans nos applications, la taille du disque (pour la classification) a été fixée à cinquante et n'apparaît pas comme un paramètre sensible de la méthode.

Une évaluation visuelle des résultats du processus d'appariement conduit à un taux de fautes de l'ordre de 30%. Ces fautes peuvent avoir plusieurs origines (cf. figures B.2.5 et B.2.7). À ce niveau du processus, deux solutions se présentent afin de réduire la proportion de fautes : effectuer un filtrage photogrammétrique ou augmenter la multiplicité des points de liaisons.

Nous avons retenu la seconde solution car elle n'exclut nullement un filtrage photogrammétrique *a posteriori*. Le filtrage pourra pleinement tirer profit de toutes les informations issues des images (points de liaisons à tous ordres).



véhicule en mouvement

zones ressemblantes localement

**figure B.2.5** : exemples de sources de fautes



**figure B.2.6** : exemple de source d'erreur : zone texturée



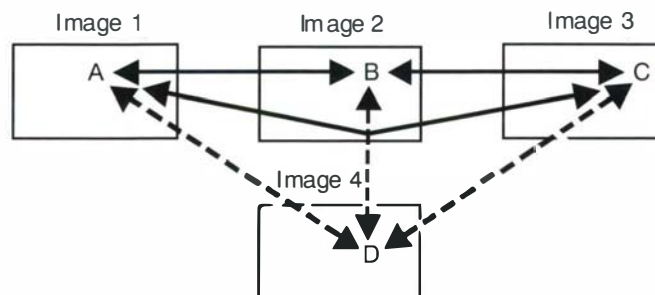
**figure B.2.7** : exemple de point correct

### Calcul des points multiples

Les points multiples sont calculés à partir des couples de points homologues issus de l'étape précédente. Un point multiple est considéré comme valide lorsque, pour chaque couple de points participant au point multiple, le couple est reconnu comme un couple de points homologues issus de l'étape précédente.

La construction des points multiples se fait itérativement : les points d'ordre  $n + 1$  sont cherchés en s'appuyant sur les points d'ordre  $n$  et en parcourant la liste des couples de points homologues, comme le montre la figure B.2.8.

Le processus s'arrête dès qu'aucun point d'ordre supérieur ne peut être construit. Cette étape ne comporte aucun paramètre.



**figure B.2.8** : exemple de point multiple d'ordre 3 servant à la construction d'un point multiple d'ordre 4

### Mise en œuvre

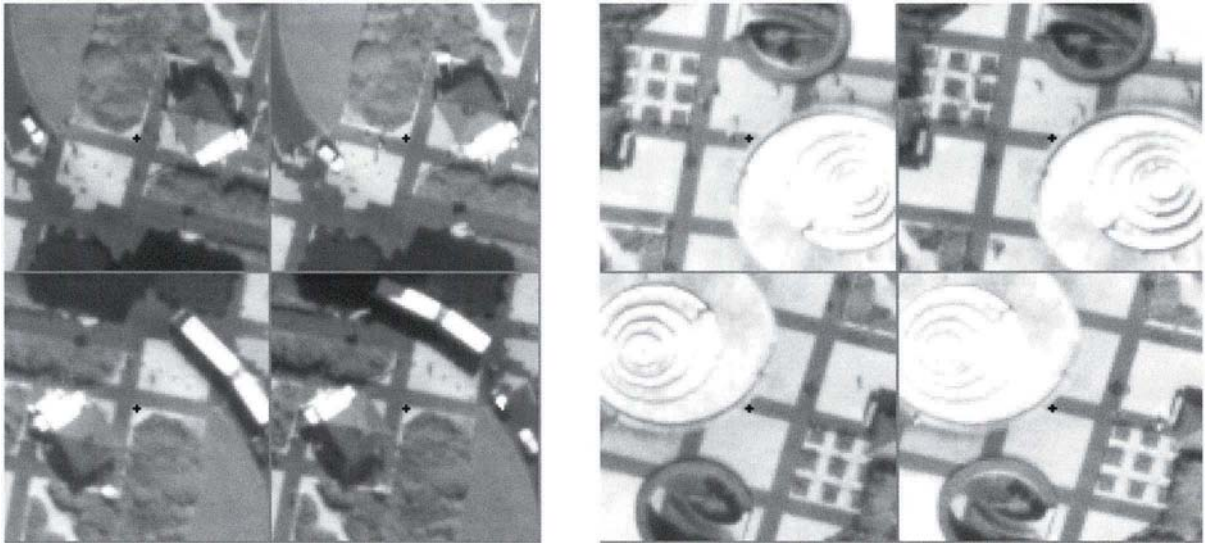
Pour le chantier de Rennes décrit plus haut, avec les mêmes caractéristiques des machines que pour le tableau d'assemblage :

- détection des points d'intérêt sur une image : 30 secondes (temps total pour le chantier : 12 heures),
- calcul des points homologues d'un couple : 25 secondes (fort recouvrement), 5 secondes (faible recouvrement), (temps total pour le chantier, soit 10 000 couples : 48 heures),
- calcul des points : temps total pour le chantier : 24 heures.

## Évaluation

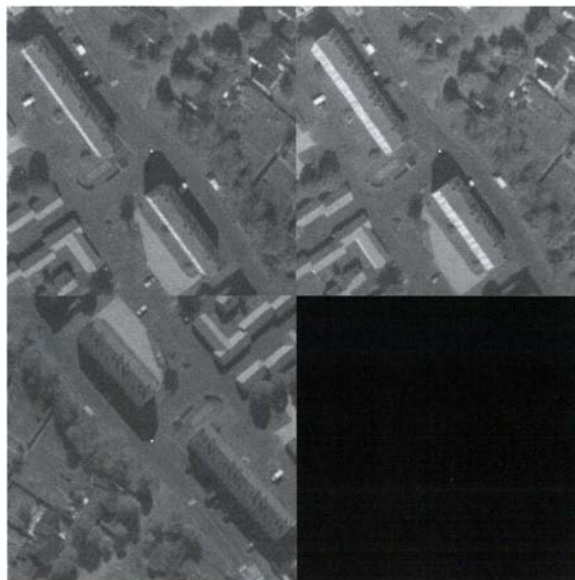
Des évaluations visuelles ont été menées ainsi qu'une évaluation photogrammétrique (cf. partie suivante). L'évaluation visuelle a permis de constater que :

- d'une part, les points d'intérêts situés en limite d'ombre ne constituent pas dans tous les cas des points fiables pour un calcul photogrammétrique (figure B.2.10),
- par ailleurs, quelques fautes subsistent dans les zones texturées,
- les premières évaluations ont permis d'établir un nombre total de fautes sur les points multiples de l'ordre de 5%. Le taux de faute varie nettement en fonction de la multiplicité des points. En effet, plus un point est de multiplicité élevée plus ce point possède des relations de ressemblance cohérentes, et plus il est fiable. Ainsi, la fiabilité augmente avec l'ordre du point de liaison,
- compte tenu du nombre important de points de liaison présents à la fin de cette étape, une étude d'un filtrage photogrammétrique local des points de liaison s'est avérée pertinente.



**figure B.2.9**

*Exemple de points quadruples (les images de la seconde ligne sont inversées car elles appartiennent à une bande différente).*



**figure B.2.10** : exemple d'erreur sur les ombres

# Filtrage des points multiples

Didier Boldo

A l'issue des algorithmes précédents, il reste un grand nombre de points de liaisons, dont la fiabilité ne peut être assurée. C'est pourquoi il a été nécessaire de mettre en place un mécanisme de filtrage et de sélection de ces points. Le filtrage est basé sur l'algorithme dit "algorithme des huit points" [HARTLEY 97]. Techniquement, cet algorithme calcule la matrice fondamentale associée à un couple de clichés.

Si on note  $u$  et  $u'$  les vecteurs projectifs représentant, dans le repère cliché, deux points homologues, la matrice fondamentale  $F$  est définie par :

$$u'^T F u = 0.$$

Moyennant quelques précautions numériques, l'algorithme permet de calculer très rapidement et de manière relativement stable la matrice fondamentale la plus probable associée à un échantillon de points. À partir de la matrice fondamentale, il est possible de déterminer la droite épipolaire associée à un point  $u$ , et donc également de calculer la distance entre  $u'$ , homologue de  $u$ , et cette droite épipolaire. Cette distance est une forme de "résidu" et permet donc de qualifier les points. Cet algorithme est très général, et permet une mise en place quelle que soit la configuration. Il a donc été utilisé pour tous les ensembles de deux clichés ayant au moins neuf points en commun, quels que soient leurs positions respectives.

Dans la pratique, pour chaque "couple" on tente une mise en correspondance itérative : on met en place, on calcule les résidus, on élimine les points ayant un résidu supérieur à trois EMQ, et on réitère la mise en place, et ce jusqu'à ce que celle-ci soit satisfaisante, ou que le procédé soit stabilisé.

Si la convergence n'a pu avoir lieu, on essaie alors un algorithme aléatoire [ZHANG 96] : on choisit  $N$  échantillons de points de liaisons et applique l'algorithme sur chaque échantillon. Les résidus sont ensuite calculés sur l'ensemble des points, et on conserve la mise en place dont la médiane des résidus est la plus faible. Actuellement, on effectue deux cents tirages de seize points, et les résultats semblent à peu près constants. Si l'une des méthodes a donné une mise en place satisfaisante, on élimine tous les points dont le résidu est supérieur à trois fois la médiane.

Cette méthode a été testée sur le chantier de Rennes décrit précédemment. Le traitement des 2 889 539 points de liaisons, représentant environ 10 000 couples, a été effectué en quatre heures sur un PC PII 333 MHz, 128 Mo de RAM. Il a permis d'éliminer 673 030 points, soit 23%.

## Choix des points pour l'aérotriangulation

Malgré le traitement précédent, il reste beaucoup trop de points pour le calcul d'aérotriangulation. Il est donc nécessaire de faire une sélection des points avant le calcul d'aérotriangulation. Ce choix prend en compte deux contraintes. La première vient du mode de calcul des points de liaisons : plus ceux-ci sont d'ordre élevé, plus ils ont de chance d'être justes. On privilégie donc les points d'ordre élevé. Ensuite, on souhaite généralement conserver des points proches de chaque nadir de cliché, ainsi que des points en inter bandes.

Afin de satisfaire simplement ces contraintes, un programme a été mis au point. A chaque cliché, on attribue donc cinq "paniers", régulièrement espacés le long du nadir (voir figure B.2.11, ci-dessous). Avec les points d'ordre  $n$  (on commence par les points d'ordre maximum), on tente de remplir chaque panier. À la fin de ce remplissage, si plusieurs points remplissent un même panier, on choisit aléatoirement celui qui est conservé. Tous les paniers qui ont été remplis sont alors bloqués, et on tente de remplir les paniers restants avec les points d'ordre  $n - 1$ , puis avec l'ordre  $n - 2$ ...

Le programme choisit 4 127 points sur les deux millions du chantier de Rennes en environ une minute sur un PC 333 MHz.

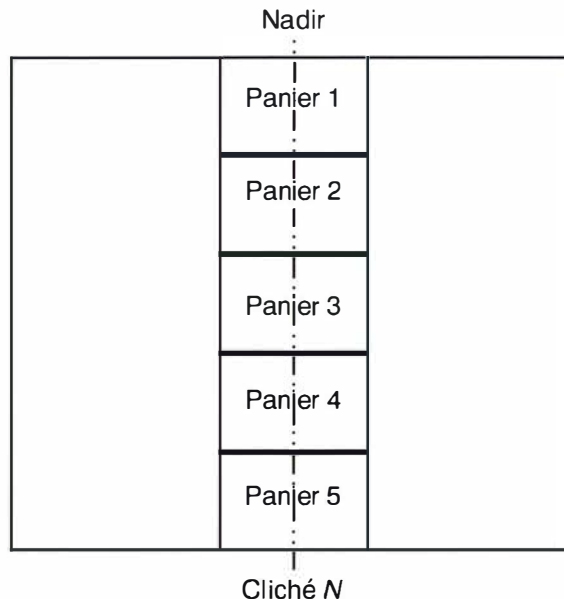


figure B.2.11 : définition des "paniers"

## Validation photogrammétrique

Yann Wehrstedt

La validation des algorithmes décrits dans cet article est menée sur le chantier d'orthophotographie urbaine de Rennes (WEHRSTEDT 99), dont voici les caractéristiques techniques :

- prise de vue par caméra numérique couleur,
- taille des images : 3 071 x 2 048,
- taille du pixel : 30 cm au sol,
- 882 images dans 14 bandes pour la partie utile, soit 60 par bande,
- recouvrement de 70% en intra-bande et de 20 % en inter-bandes,
- 4 127 points de liaison, soit 4,7 par image en moyenne,
- 18 846 mesures image, soit 4,5 par point et 21 par image.

### Multiplicité des points de liaison

La multiplicité des points constatée sur le bloc de Rennes est la suivante :

Multiplicité	2	3	4	5	6	7	8
Pourcentage du nombre de points de liaison	0,9%	24,1%	31,5%	9,9%	24,4%	8,8%	0,3%

De façon générale, ces multiplicités très élevées sont dues au fort recouvrement intra-bande, qui permet d'avoir des points quadruples en intra-bande et octuples en inter-bandes. Signalons que ces derniers sont moins nombreux que ce que l'on pourrait espérer, mais que le paramétrage de l'algorithme de tirage doit encore être étudié. Les points possèdent une forte redondance de mesures image, ce qui permet de détecter les fautes très facilement. Cette redondance a pour effet de rigidifier le bloc et de rattraper son médiocre B/H.

### Répartition des points de liaison

La répartition des points dans le bloc est moins homogène que dans le cas de mesures manuelles (voir figure B.2.12), mais cela n'entraîne aucun problème pour l'aérotriangulation, sans doute en raison de la multiplicité élevée des points.

En particulier, les nadirs, le long desquels les points sont théoriquement situés, sont difficilement reconnaissables. On remarquera l'augmentation du nombre de points inter-bandes par rapport au bloc BD Topo, ces points n'étant pas plus coûteux que les points intra-bande pour la mesure automatique.

Les critères de sélection de l'algorithme de tirage feront l'objet d'une prochaine étude afin de rendre la répartition des points plus homogène. En l'état et à l'échelle du bloc, cette répartition est amplement satisfaisante du point de vue de l'aérotriangulation.

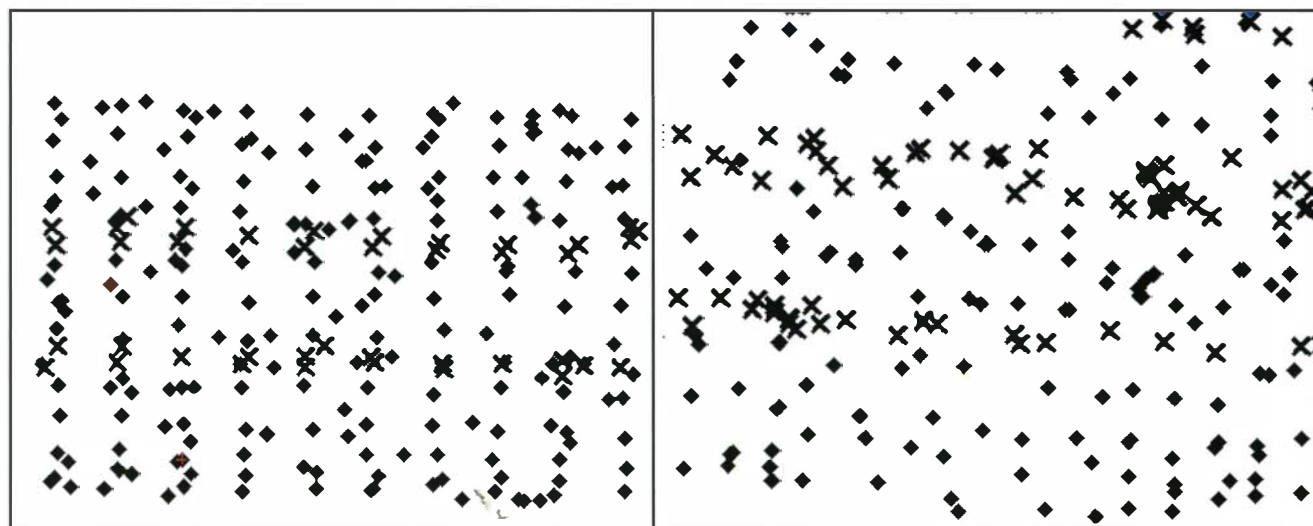


figure B.2.12

À gauche, répartition des points de liaison d'un bloc BD Topo ; à droite, répartition pour le bloc de Rennes (les croix symbolisent des points inter-bandes).

## Évaluation du taux de fautes

La manipulation consiste à faire l'aérotriangulation du bloc en l'appuyant sur la trajectographie GPS. Au cours de ce calcul, la correction du bloc est faite, c'est-à-dire que l'on intervient sur les points dont les résidus image dépassent un seuil fixé ici à un pixel : dans ce cas, on peut inactiver les mesures non conformes ou dédoubler le point.

Qualitativement, cette correction se fait dans les mêmes conditions que pour des mesures manuelles car le ratio nombre de points de liaison / nombre d'images obtenu à l'issue du tirage est identique à celui employé sur les chantiers classiques. Quantitativement, sur les 4 127 points choisis pour le calcul d'aérotriangulation, seuls douze (0,3%) ont un résidu supérieur à un pixel (ce sont souvent des points situés sur des bords d'ombres qui se sont déplacées pendant le laps de temps séparant la prise de vue de deux bandes consécutives), et quatre (0,1%), un résidu supérieur à deux pixels : c'est un taux de fautes extrêmement faible qui implique un temps de correction très court. D'un point de vue opérationnel, cela signifie que la correction du bloc pourra être faite en quelques itérations de la compensation et avec les mêmes outils de correction que pour les mesures manuelles : les points problématiques seront contrôlés individuellement, ce qui est un gage de qualité pour la cohérence du bloc. En effet, les algorithmes de mesure automatique ont souvent tendance à fournir un nombre de points tel qu'il devient nécessaire d'employer des outils de correction automatique dont l'effet peut être imprévisible (par exemple, désactivation de tous les points entourant une faute, créant un trou dans la répartition des points de liaison) : ce défaut a été évité ici. D'autre part, on supprime la manipulation coûteuse de la reprise de mesures, qui est courante pour des mesures manuelles.

## Résultats d'aérotriangulation

A l'issue des corrections, l'emq du bloc se stabilise aux valeurs suivantes :

- 0,2 pixel toutes mesures confondues,
- 0,25 pixel en inter-bandes.

Ces résultats sont d'excellente qualité : l'emq image est homogène tant en intra- qu'en inter-bandes, ce qui n'est pas le cas des mesures manuelles, où le report des points d'une bande à l'autre dans le cadre du " pugage " est moins précis. De plus, l'emq image est meilleur que le quart de pixel, ce qui prouve que pour la mesure de points de liaison, le pointé sub-pixellaire n'est pas une nécessité.

## Réalisation d'une ortho-image

Dans le but de produire une ortho-image de la ville de Rennes, un calcul d'aérotriangulation en absolu a été effectué, pour lequel le bloc s'est comporté de façon standard. En raison de l'équipement terrain choisi, une précision planimétrique de cinquante centimètres a été obtenue, et de quatre-vingt centimètres pour l'altimétrie, valeurs convenables pour la réalisation d'une ortho-image de résolution trente centimètres. La qualité géométrique des images ortho-rectifiées a confirmé l'excellente qualité de l'aérotriangulation : les raccords entre images sont meilleurs que le pixel (pour les parties au sol) et le mosaïquage en est facilité.

En conclusion, l'expérience montre que la chaîne actuelle (point de liaisons automatiques – filtrage – tirage), permet, pour des images des caméras numériques, de produire des points de liaisons automatiques d'excellente qualité en termes de précision et de fiabilité, satisfaisant ainsi les critères de l'aérotriangulation. Ces résultats sont très prometteurs, surtout compte tenu du fait que Rennes est un chantier test où de réelles difficultés ont été rencontrées, dues au manque de recouvrement de certaines portions de bandes et au grand nombre d'images à traiter (il s'agit du bloc le plus important par le nombre d'images traité à l'IGN jusqu'à présent). Le potentiel photogrammétrique des caméras numériques semble désormais clairement établi.

## Références

[HARRIS 88] C. Harris & M. Stephens : *A combined edge and corner detector*, in Proc. of the 4th Alvey Conference, pp. 147-151, Manchester (UK), 1988.

[HARTLEY 97] R.I. Hartley : *In defense of the Eight-Point Algorithm*, in IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 19, n° 6, pp. 580-593, June 1997.

[SCHMID 96] C. Schmid : *Appariement d'images par invariants locaux de niveaux de gris*, thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.

[ZHANG 96] Gang Xu & Zhengyou Zhang : *Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition*, Kluwer Academic Publishers, pp. 102-105, 1996.

## Publications

[OUDINE 98] C. Oudine : *Mise en correspondance d'images : construction automatique du tableau d'assemblage d'une prise de vue*, stage de DESS IASV, laboratoire MATIS, IGN-SR 980016/C-RAP, 1998.

[RAJAONARISON 98] D. Rajaonarison : *Appariement de points d'intérêts dans N images : Application à la mesure automatique de points de liaison multiples pour l'aérotriangulation*, stage de DEA SIG, laboratoire MATIS, IGN-SR 980010/C-STA, 1998.

[WEHRSTEDT 99] Y. Wehrstedt : *Orthophoto de la ville de Rennes par caméra numérique couleur*, compte rendu de production de la filière photogrammétrique, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 990018/C-RAP, 1999.

## B.3 Une structure de modèle numérique de terrain (MNT) intégrant reliefs hétérogènes et discontinuités

Philippe Hottier

### Introduction

Cette action de recherche est dans la ligne des essais faits tout au long de la thèse [HABIB 97].

Pour les besoins de cette thèse, on avait adopté une structure de MNT basée sur les considérations suivantes :

- l'emprise est divisée en carreaux réguliers de côté  $p$ ,  $nx$  carreaux en largeur et  $ny$  en profondeur,
- le MNT est alors entièrement défini par la donnée de  $(nx + 1) (ny + 1)$  quadruplets de nombres, un en chaque nœud  $j$  donnant l'altitude  $z$ , les dérivées  $z'_x$  et  $z'_y$  et la dérivée croisée  $z''_{xy}$  ... Si ces trois dérivées sont ramenées à un carreau de côté unité (la dérivée réelle en  $x$  est alors  $z'_x/p$ ), alors sur le carreau  $ij$  ( $i$  : rang de ligne,  $j$  rang de colonne), la surface est représentée par la cubique dite de Kubik et Botman ; l'altitude en un point  $xy$  du carreau (origine coin inférieur droit, de coordonnées  $00$ ) est donnée par la formule suivante :

$$z = (1 - y + y^2 - y^3) U M U^T (1 - x + x^2 - x^3)^T$$

( $U^T$  désigne la matrice transposée de  $U$ ); avec :

$$(1) \quad U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3 & -2 & 3 & -1 \\ 2 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} Z(0,0) & Z'_x(0,0) & Z(1,0) & Z'_x(1,0) \\ Z'_y(0,0) & Z''_{xy}(0,0) & Z'_y(1,0) & Z''_{xy}(1,0) \\ Z(0,1) & Z'_x(0,1) & Z(1,1) & Z'_x(1,1) \\ Z'_y(0,1) & Z''_{xy}(0,1) & Z'_y(1,1) & Z''_{xy}(1,1) \end{pmatrix}$$

L'avantage déterminant de la méthode est que la surface ainsi définie est lisse au premier ordre près sur la totalité de l'emprise : en chaque point  $xyz$  il n'y a qu'un seul plan tangent.

Le passage d'un semis en  $xyz$  à cette forme est décrit dans la thèse : il prend très peu de temps. Il est même instantané pour un semis régulier dont on désire conserver le pas.

D'une manière générale, le choix du pas  $p$  (largeur du carreau), dépend évidemment de la nature du relief : il faut que celui-ci puisse sur chaque carreau être correctement représenté par la cubique du type indiqué.

En pratique, il est probable qu'en ce qui concerne la BD Topo, il s'étagé entre 15-25 mètres et 100-150 mètres (ces derniers chiffres pour les parties plates de la Champagne (F), par exemple).

Un outil décrit dans la thèse permet justement de juger de la pertinence de ce choix et de la reproductibilité du MNT pour ce pas  $p$  : il s'agit de l'erreur de rendu qui a une parenté avec la courbure moyenne, mais qui est infiniment plus facile à chiffrer.

La moyenne de cette erreur sur l'emprise permet de répondre à la question suivante : si nous livrons à deux utilisateurs le même semis régulier d'altitudes, à quel écart doit-on s'attendre entre la surface reconstruite par chaque utilisateur avec ses propres méthodes ?

Cet écart est justement de l'ordre de grandeur, de l'erreur de rendu et il devrait être en principe largement inférieur à l'erreur moyenne quadratique d'altitude.

La quantité en question mesure en quelque sorte le compromis entre deux buts inconciliables : une surface lisse partout et une surface qui, localement minimise les variations de courbure.

Sa définition est la suivante : si sur un profil en  $x$ ,  $z_{-1}, z_0, z_1, z_2$  sont les altitudes en quatre nœuds successifs, l'erreur de rendu locale en  $x$  est donnée par :

$$e_{\text{rendu}} = \frac{1}{8\sqrt{105}} \left( |z_{-1} - 4z_0 - 5z_1 - 2z_2| + |-2z_{-1} + 5z_0 - 4z_1 + z_2| \right) \quad (2)$$

(le coefficient  $105 = 3 \times 5 \times 7$  provient simplement de la comparaison d'une courbe représentée par spline d'ordre 2 avec une cubique).

Or, lorsqu'on examine comment l'erreur de rendu en  $x$  et l'erreur de rendu en  $y$  varient sur la surface d'un MNT, on s'aperçoit qu'en général elles varient faiblement sur la plus grande partie de l'emprise, mais peuvent présenter sur certains carreaux des valeurs anormalement élevées.

Ainsi, sur un MNT traité par HABIB (Saint-Martin, issu d'un semis de la BD Topo au pas de 25 m), les erreurs de rendu en  $x$  et en  $y$  étaient en moyenne et respectivement de 0,43 et 0,45 m, mais atteignaient sur certains carreaux plus de 2 m.

Or il se trouve que les zones correspondantes présentaient des anomalies évidentes provenant d'un lissage inadéquat : le torrent censé les traverser, remontait vers l'amont. Dans ces zones, le pas de 25 m était donc insuffisant.

Les essais pour le forcer à couler dans le bon sens, d'ailleurs couronnés de succès, ont fait apparaître que cela n'était pas possible, sans modifier de façon appréciable le relief des abords immédiats.

En conséquence, livrer un semis régulier au pas de 25 m uniformément sur toute l'emprise, quand un torrent et sa gorge apparaissent comme des caractéristiques importantes du paysage, peut être considéré comme une erreur. Un remède évident est de moduler le pas en fonction du relief surjacent.

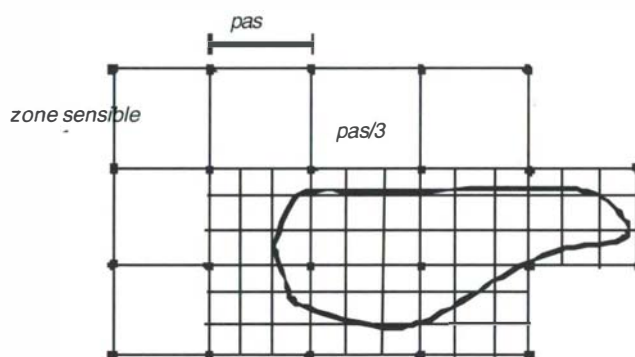
Par ailleurs, la méthode de description que nous venons de rappeler a une limitation évidente : elle ne permet pas de prendre en compte des discontinuités (falaise, rupture de pente, zones côtières...) ni bien sûr les artefacts humains : routes, ponts enjambant une rivière et bâti.

La recherche entreprise avait donc pour objectif de concevoir une structure plus large permettant d'intégrer tous ces éléments tout en conservant sa philosophie première : sur chaque région délimitée par des discontinuités, le MNT est lisse : un seul plan tangent en chaque point.

## MNT à carreau modulé

Dans ce cas, la nouvelle organisation des données avant visualisation est simple à concevoir :

- un fichier grille primaire de pas  $p$  (en chaque nœud  $ij$  données  $z, z', z'y, z''xy$ ) couvrant l'ensemble de l'emprise,
- un fichier secondaire couvrant les carreaux correspondant à un relief plus fin.



**figure B.3.1**

*Modulation du pas en fonction de la difficulté du relief,  
la seule précaution à prendre est à veiller au raccordement sur les frontières.*

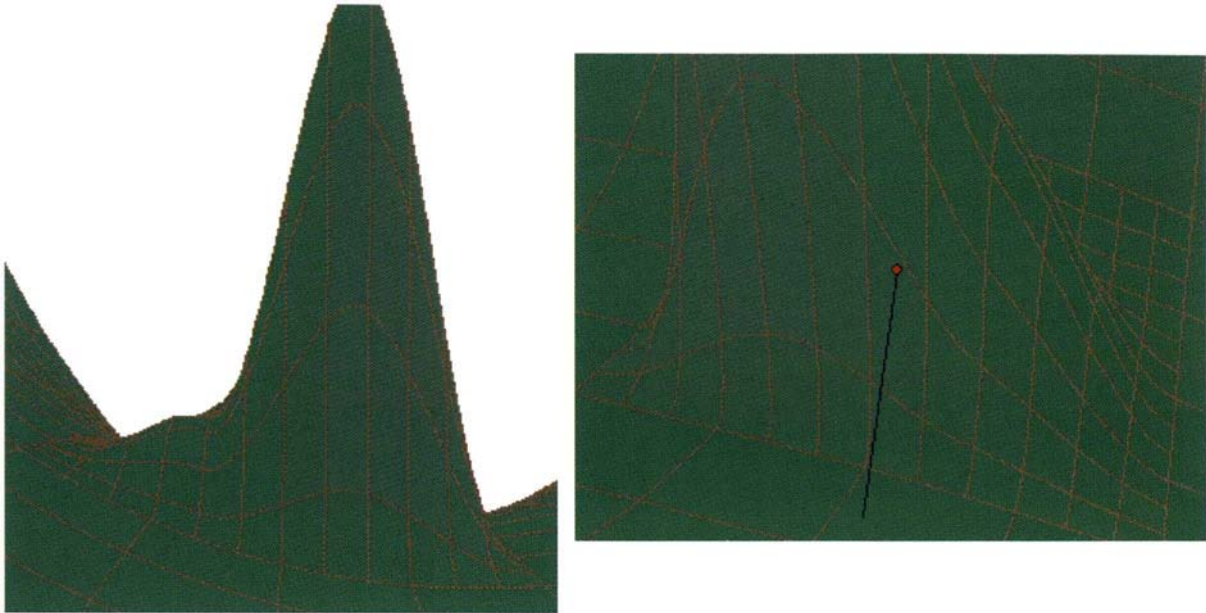
La seule précaution à prendre est d'assurer à tout prix la jonction des surfaces secondaires avec la surface définie par la grille primaire.

Ceci est aisé à réaliser : il faut veiller en tout nœud frontière à identifier le quadruplet  $z, z'_x, z'_y, z''_{xy}$ , avec le quadruplet analogue défini au même point  $xy$  sur la grille primaire : il y a alors identité des plans tangents sur les bords frontières.

La figure B.3.2 montre un exemple : une sorte de bosse qui contraste avec le relief environnant : on constate qu'effectivement la précaution précitée assure une jonction parfaite.

Seule, pour l'instant, la partie organisation des données en vue de la représentation finale a été traitée ; il reste à remonter d'un semis  $xyz$  relatif à une zone à relief diversifié à cette organisation. Ce ne sera *a priori* possible que si le semis est suffisamment dense dans les zones délicates.





**figure B.3.2**

Exemple élémentaire de MNT à pas modulé. À une portion de surface représentée par les quadruplets  $z, z', z', z''$  aux nœuds d'une grille principale de pas  $p$  a été substituée une bosse représentée par une sous-grille de pas  $p/3$ .

## Les discontinuités

Là, le problème d'organisation s'est avéré beaucoup plus délicat. Les discontinuités surviennent à l'aplomb de falaises verticales, de ruptures de pente, en bordure de côte ou de plans d'eau, le long de routes encaissées ou en remblai.

Les falaises peuvent même présenter des surplombs. Nous nous bornons d'abord, dans ce qui suit, aux discontinuités naturelles.

La difficulté est, que les lignes définissant ces discontinuités en projection horizontale sont sinueuses. Les régions qu'elles déterminent ont les contours les plus divers.

En bref, quand on cherche à organiser les données de façon rationnelle, on bute inévitablement sur la question : étant donné un point  $xy$  dans quelle région est-il et quelle est son altitude ?

Il faut pour cela être capable de ranger de façon univoque toutes les régions. Ce problème a pu être résolu grâce aux notions très simples d'arc standard et de polyarc que nous présentons maintenant.

## Arc standard relatif à un rectangle parallèle aux axes

Sur un rectangle  $(xmin, ymin, xmax, ymax)$ , nous désignerons par arc standard :

- soit, un arc fermé (ne se recoupant pas), *strictement intérieur* au rectangle,
- soit, un arc ouvert (ne se recoupant pas), *ayant son origine et son extrémité sur la frontière du rectangle*.

À ceci près, un arc standard est absolument quelconque. Il peut présenter naturellement des points anguleux.

Nous avons choisi, pour notre part, de représenter chaque arc constitutif d'un arc standard par une cubique normalisée (de Bézier), sous la forme :

$$m = a_0 + a_1v + a_2v^2 + a_3v^3; \text{ avec } v \in [0,1]; a_0, \dots, a_3 \in R^2 \quad (3)$$

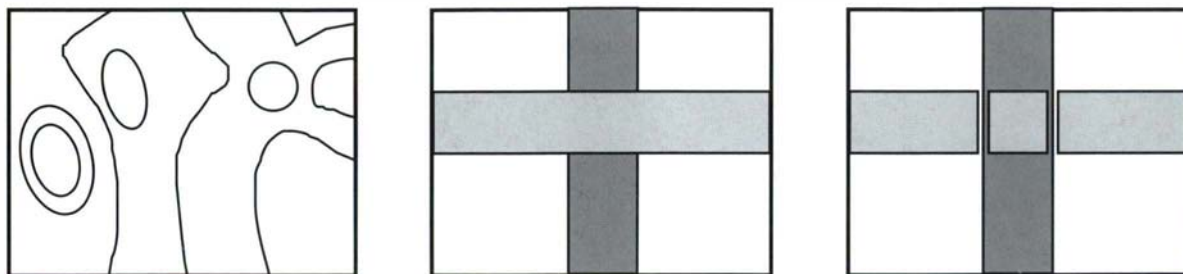
ou sous la forme équivalente :

$$m = s_0 (1-v)^3 + 3s_1 (1-v)^2v + 3s_2 (1-v)v^2 + s_3v^3; s_0, \dots, s_3 \in R^2 \quad (4)$$

très pratique, car  $s_0$  et  $s_3$  sont les extrémités de l'arc, les vecteurs  $s_0s_1$  et  $s_2s_3$  sont tangents aux extrémités et l'arc est contenu dans l'enveloppe convexe des quatre points  $s_0, \dots, s_3$ .

**Polyarc : c'est par définition tout ensemble constitué d'un rectangle et d'un ensemble d'arcs standards disjoints deux-à-deux**

Un polyarc peut donc représenter une grande variété de situations : seuls les arcs tangents et le croisement - par exemple une route passant au-dessus d'une rivière - sont interdits, mais comme le montre la figure B.3.3, des subterfuges très simples permettent de passer outre.



**figure B.3.3**

Un polyarc composé de neuf arcs standard (dont quatre fermés).

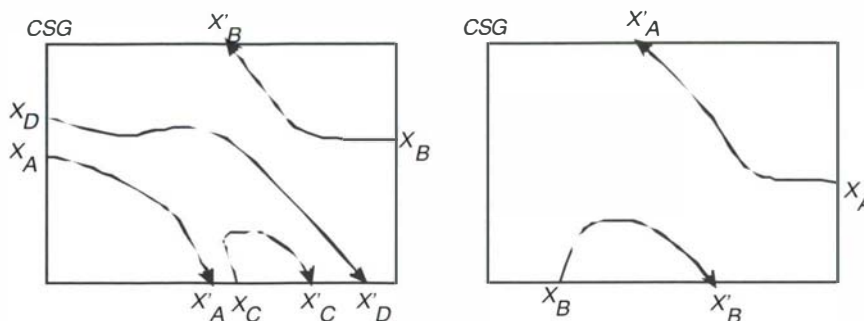
Situation interdite à un polyarc (route au-dessus d'une rivière).

Une solution de type polyarc à ce problème.

**Classement univoque des arcs standards d'un polyarc à arcs ouverts et des régions qu'il déterminent**

On constate immédiatement qu'un polyarc comportant  $n$  arcs standards définit  $(n + 1)$  régions distinctes. Ces arcs et ces régions peuvent être classés univoquement de la façon suivante :

- la région 0 est par convention, celle qui contient le coin supérieur gauche CSG (xmin, ymax) du rectangle du polyarc. Si par hasard, un arc standard passe par le CSG, on prendra soin, pour ne pas compliquer outre mesure les algorithmes, d'en décaler légèrement l'extrémité, d'une quantité non significative par rapport à la précision recherchée (ici celle du MNT). Par exemple, si l'arc ayant son extrémité au CSG est donné sous la forme (4) et si  $s_0$  coïncide avec le CSG, on modifiera la coordonnée x de  $s_0$  de  $p/1000$ , p étant le pas du MNT,
- on classe par ordre croissant, en prenant comme origine le CSG sur le contour du rectangle et dans le sens direct les abscisses de tous les arcs standards du polyarc,
- on oriente chaque arc standard de telle sorte que l'abscisse de son origine  $x_0$  soit inférieure à celle de son extrémité  $x'_0$  ( $x_0 < x'_0$ ),
- l'arc 0 est l'arc standard dont l'abscisse de l'extrémité est la plus faible,
- l'arc 1 a pour origine le point d'abscisse suivant, soit x, si  $x \neq x'_0$ , ou le point d'abscisse venant après si  $x = x'_0$ ,
- etc.



**figure B.3.4**

Deux polyarcs quelconques composés d'arcs ouverts. On commence par les orienter, de telle sorte que sur le contour du rectangle (orienté dans le sens direct, origine au coin supérieur gauche CSG, l'abscisse de leur origine soit inférieure à l'abscisse de leur extrémité, puis on lit la série croissante des abscisses.

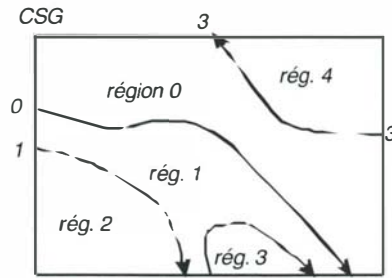


figure B.3.5

Classement univoque des arcs standards d'un polyarc composés d'arcs ouverts. L'arc 0 est celui dont l'origine a l'abscisse minimale etc. La région 0 est celle contenant le CSG ; la région  $i > 0$  est située à droite de l'arc  $(i - 1)$ . L'image topologique du polyarc représentée est : (0, 1, 1, 2, 2, 0, 3, 3).

Les régions se numérotent exactement dans le même ordre ; la région 0 est la seule, rappelons-le, à contenir le CSG : la région  $i > 0$  est celle se trouvant à droite de l'arc  $(i - 1)$ .

Si on considère alors la suite ordonnée des numéros des extrémités d'arcs rencontrés sur le contour du rectangle, on constate qu'elle constitue une image topologique linéaire du polyarc et des régions qu'ils déterminent ; deux couleurs distinctes suffisent à colorer ces régions. Par exemple, l'image topologique correspondant à la figure B.3.5 est (0, 1, 1, 2, 2, 0, 3, 3).

L'exploitation d'une telle suite associée aux valeurs des abscisses permet de définir le contour de n'importe laquelle des régions définies par le polyarc.

Ainsi, le contour de la région  $i > 0$ , commence à l'origine  $x_{i-1}$  de l'arc  $(i - 1)$ . Il comporte la portion du contour du rectangle comprise entre  $x_{i-1}$  et l'abscisse suivante  $x$ , si  $x = x'_{i-1}$ , il se termine par l'arc  $(i - 1)$  ; si  $x \neq x'_{i-1}$ , autrement dit si  $x = x_i$ , il comporte l'arc  $i$ , etc.

Le contour de ladite région se termine toujours par l'arc  $(i - 1)$ . Un tel contour est toujours orienté dans le sens direct. Pour la région 0, la procédure est légèrement différente : vient d'abord, la portion du contour du rectangle comprise entre le CSG et  $x_0$ , puis l'arc 0, puis la portion du contour du rectangle comprise entre  $x_0$  et l'abscisse suivant  $x$ , etc.,... et finalement retour au CSG.

La programmation de cet algorithme est, comme on le verra, indispensable pour la suite.

## Classement univoque des arcs standards du polyarc le plus général (comportant des arcs ouverts ou fermés) et des régions qu'il détermine dans l'ordre naturel

On oriente tous les arcs standards fermés dans le sens *rétrograde*. On classe ensuite les arcs ouverts et les régions qu'ils définissent de la manière indiquée ci-dessus.

Si la région  $i$  contient un arc fermé et un seul, tous les numéros d'arc supérieurs à  $i$  sont augmentés d'une unité et l'arc fermé reçoit le numéro  $(i + 1)$  ; si elle en contient deux définissant deux domaines disjoints, on numérote  $(i + 1)$  celui dont le CSG du rectangle circonscrit a l'abscisse minimale (et l'ordonnée maximale s'il y a ambiguïté).

Si un contour fermé en contient un ou plusieurs autres, on numérote en priorité le plus extérieur et ensuite les autres - avant de revenir à un autre arc extérieur - . On constate que cette façon de faire définit bien un classement univoque des arcs standards du polyarc et des régions qu'il détermine, et qu'avec les conventions faites la région  $i > 0$  est toujours à droite de l'arc  $(i - 1)$ .

Pour les deux polyarcs de la figure B.3.6, les images topologiques sont respectivement :

(0, 1, 2, 2, 1, 3, 3, 0, 4, 4, 5, 6, 6, 5, 7, 7) et (0, 0, 1, 1, 2, 2, 3, 4, 4, 5, 6, 6, 5, 3), pour un arc fermé (comme l'arc 4 de la figure de gauche) et, par convention, son numéro est redoublé dans cette suite.

Sans examiner la figure, on déduit, par exemple de la première de ces suites :

- que, si l'arc 2 est fermé, la région qu'il détermine (celle qui est à sa droite), à savoir la région 3, est intérieure à la région 2 et que, fermé ou non, son contour fait partie de celui de cette région,

- que, si les arcs 2 et 3 sont fermés, la région 4 est extérieure à la région 3, que ces deux régions sont toutes deux dans la région 1; que si les arcs 1 et 3 sont fermés, ils sont tous deux dans la région 1 (celle à droite de l'arc 0), et que le point haut de l'arc 1 est plus au nord et plus à l'ouest que celui de l'arc 3, etc.,...

Noter que le procédé s'applique à la limite à un rectangle divisé en carrés : si on considère ces carrés comme des arcs standards fermés on trouve qu'ils sont classés dans l'ordre matriciel classique (la région 0 étant alors réduite à une ligne).

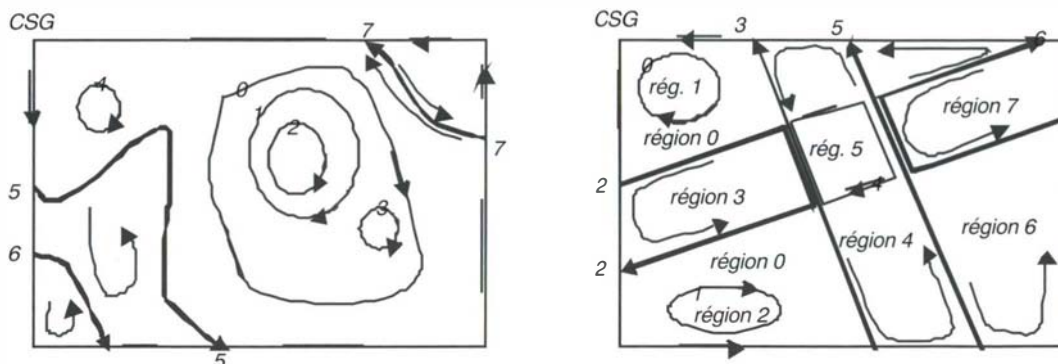


figure B.3.6

Classement univoque des arcs et des régions définis par un polyarc comportant des arcs fermés. Les arcs fermés sont orientés dans le sens rétrograde. La région  $i > 0$  est toujours à droite de l'arc  $(i - 1)$ . Les images topologiques correspondant à ces deux polyarcs sont  $(0, 1, 2, 2, 1, 3, 3, 0, 4, 4, 5, 6, 6, 5, 7, 7)$ , et  $(0, 0, 1, 1, 2, 2, 3, 4, 4, 5, 6, 6, 5, 3)$ . Noter que dans la pratique les arcs standards peuvent avoir des parties communes : ainsi à droite pour l'arc 2 et l'arc 3.

### Trouver la région à laquelle appartient un point $m$ de coordonnées planimétriques $xy$

Nous supposons toujours que le CSG n'est pas sur le polyarc.

La solution est basée sur la remarque suivante :

- un point  $m$  ne peut être dans la région 0 que si le segment CSG $m$  (joignant le CSG au point  $m$ ) coupe l'arc 0 en un nombre pair de points,
- un point ne peut être dans la région  $i > 0$  que si le segment CSG $m$  coupe l'arc  $(i - 1)$  en un nombre impair de points.

Il suffit donc de rechercher les intersections de CSG $m$  avec les  $n$  arcs standards du polyarc et de les classer par distances croissantes à  $m$ ; la région où se trouve le point  $m$  est alors définie à partir du plus proche point d'intersection avec un arc coupant CSG $m$  en un nombre impair de points : si  $i$  est le numéro de cet arc celui de région est  $(i + 1)$ ; si un tel point n'existe pas  $m$  est dans la région 0.

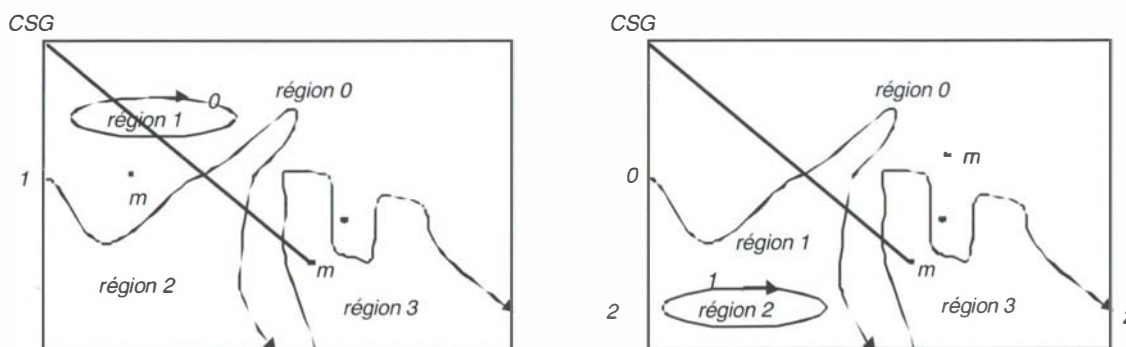


figure B.3.7

Détermination du numéro de région à laquelle appartient un point  $m$  : on cherche l'intersection la plus proche de  $m$  avec un arc  $i$  coupant les segments CSG $m$  en un nombre impair de points. Si cette intersection existe,  $m$  est dans la région  $(i + 1)$ , sinon il est dans la région 0.

### Application des résultats précédents à l'organisation des données d'un MNT comportant des discontinuités

Une bonne partie du temps consacré à cette recherche a consisté à rechercher les règles précédentes et à mettre en place les algorithmes correspondants. Elles permettent d'organiser rationnellement les données.

Ces données sont :

- une grille principale de pas  $p$  (largeur du carreau principal), qui vaudra en général pour la plus grande partie de l'emprise, autrement dit pour la majorité des carreaux, donnant en chaque nœud les quatre quantités  $z$   $z'x$   $z'y$   $z''xy$ ,
- le polyarc planimétrique définissant les projections horizontales des discontinuités : c'est-à-dire, comme nous l'avons défini, un ensemble disjoint d'arcs standards ; ces arcs peuvent être donnés dans n'importe quel ordre et orientés au hasard,
- pour chaque carreau secondaire, autrement dit coupé par le polyarc, autant de sous-grilles qu'il y a de régions sur le carreau, de pas  $p/m$ , rangées dans l'ordre standard des régions propre à ce carreau.

Le problème le plus général consisterait évidemment à partir d'un niveau encore plus bas : un semis quelconque de points  $xyz$ , le polyarc et les couleurs de région à gauche de chaque arc ; ce problème fait partie d'une étape ultérieure de la recherche.

Il s'agit à présent de tirer parti de cette organisation pour représenter le MNT de n'importe quel point de vue vers n'importe quel point principal.

Il convient en premier lieu de programmer les outils suivants :

- outils de classement des régions défini par un polyarc (rappelons que celui-ci fait toujours référence à un rectangle),
- intersection d'un polyarc avec un rectangle ou un carreau  $ij$  quelconque,
- outil de définition des contours de toutes les régions définies sur un rectangle quelconque de l'emprise par le polyarc,
- outil de décomposition d'un contour en triangles.

Quant à la visualisation, son principe est une variante de celui sommairement décrit dans [HABIB 97] ; chez celui-ci, on visualisait les projections des arcs définissant les contours de chaque carreau, l'intérieur du contour étant peint avec une couleur dépendant de l'orientation par rapport au soleil ; les contours étaient affichés dans l'ordre décroissant des distances des carreaux au point de vue.

Pour obtenir un résultat visuel satisfaisant, il est alors souvent nécessaire d'introduire des sous-carreaux (on calcule les altitudes aux nœuds d'une sous-grille, de pas  $p/m$ , et ce sont les contours de ces sous-carreaux qu'on affiche dans le bon ordre).

Dans notre cas, à cause de l'irrégularité des contours des régions, il a fallu changer de procédé : tous les carreaux sont découpés en triangles. C'est élémentaire pour les carreaux principaux. On peut, par exemple, les découper en quatre triangles ; pour les carreaux secondaires (ceux coupés par le polyarc), il convient de linéariser le contour de chaque région, puis de le découper en triangles.

De plus, il faut, le long des lignes de discontinuité de première espèce, compléter par un réseau de triangles verticaux (bien entendu, s'il y a des surplombs la procédure de définition est plus lourde).

On objectera qu'on perd alors de vue l'objectif qu'on s'était fixé dès l'origine, puisque voilà que nous substituons à des surfaces lisses (celles correspondant aux différentes régions) un réseau de triangles : cela serait vrai si on en restait là, mais ce n'est pas le cas.

Sur chaque carreau, nous avons donc une petite série de prismes droits à section triangulaire (en général entre quatre et vingt), et l'algorithme des parties vues et cachées (n'afficher que les parties n'occultant que les parties déjà dessinées) sur d'aussi petites séries est extrêmement rapide.

Une fois défini l'ordre d'affichage des triangles relatifs à un carreau, on peut dupliquer chaque triangle autant de fois que nécessaire pour se rapprocher de la surface du MNT.

Décrivons cette opération : étant donné un triangle  $ABC$ , on cherche son plus long côté, par exemple,  $AB$ . On calcule l'altitude du point  $I'$ , à l'aplomb de son milieu  $I$  ; si l'angle des segments  $AI'$  et  $I'B$  diffèrent de plus de un degré d'un angle plat, et si ce côté en projection est suffisamment long, on substitue au triangle  $ABC$ , les deux triangles  $CAI'$  et  $CI'B$ , et on cherche lequel de ces deux triangles doit être affiché en premier (ce qui est évidemment un problème facile).

On duplique aussitôt, et relativement au même côté, le triangle adjacent  $DAB$  si celui-ci existe (à défaut, apparaissent des effets très désagréables).

En pratique, pour éviter tout désagrément, on commence par dupliquer tous les triangles ayant un côté sur un bord du carreau parallèle à  $Ox$  et relativement à ce côté. On fait de même pour ceux ayant un côté sur un bord parallèle à  $Oy$ , puis on passe aux autres.

Ces trois opérations peuvent être répétées. Cependant, l'expérience montre que ce n'est pas entièrement satisfaisant du point de vue visuel ; on complète alors en affichant non pas les triangles mais les contours curvilignes correspondant (sections de la surface par les plans verticaux des trois côtés). Quant à l'ombrage, il est calculé comme moyenne de ceux qui sont observés aux trois sommets du carreau.

Bien entendu l'opération de duplication n'est possible que sur les triangles dont la normale est orientée vers le haut, ainsi que sur les triangles verticaux et non pas sur les triangles en surplomb peu courants, à notre connaissance, dans les techniques géographiques.

Il convient aussi, avant l'affichage, et lorsqu'un triangle a un côté dont les extrémités sont sur un arc standard d'afficher non pas la section curviligne de ce côté par le plan vertical passant par ces extrémités, mais la portion d'arc correspondante.

Enfin le pointé à l'écran qui donne le xyz doit être effectué sur la surface réelle et non sur le réseau de triangles utilisé pour la visualiser.

## Conclusion

La première étape de cette recherche est pratiquement terminée : on a montré qu'une organisation rationnelle des données permettait effectivement d'intégrer des discontinuités et de représenter un relief diversifié.

Les figures B.3.8, B.3.9 et B.3.10 montrent le cas de discontinuités de première espèce : une sorte d'estuaire bordé de hautes falaises verticales et une route encaissée le franchissant sur un pont.

L'étape suivante devrait consister à remonter des données élémentaires à l'organisation décrite ; ces données élémentaires sont :

- un semis de points xyz, quelconque, mais suffisamment dense pour représenter partout la surface topographique avec précision,
- un polyarc.

La méthode prévue sera une extension de celle décrite dans Habib : il s'agit d'une méthode locale ; nous croyons en effet illusoire - nous savons que tous ne partagent pas notre avis - et ceci même en l'absence de discontinuités, d'utiliser une méthode de compensation globale sur l'ensemble de l'emprise car la corrélation entre erreurs relatives à des points géographiquement distants devient rapidement insignifiante par rapport aux autres causes d'erreur.

On voit du reste mal comment on pourrait recourir à une méthode globale dans le cas de discontinuités de première espèce. Il est prévu également d'étendre la notion d'erreur de rendu et les méthodes de comparaison de deux MNT.

On peut pour terminer se demander quels sont les avantages de la méthode que nous venons d'exposer ; il est bien entendu certain qu'on pourrait arriver à un résultat équivalent du point de vue de la précision, en travaillant sur un MNT brut, régulier ou non, à condition de multiplier les triangles. Alors pourquoi compliquer ?

On peut avancer les arguments suivants :

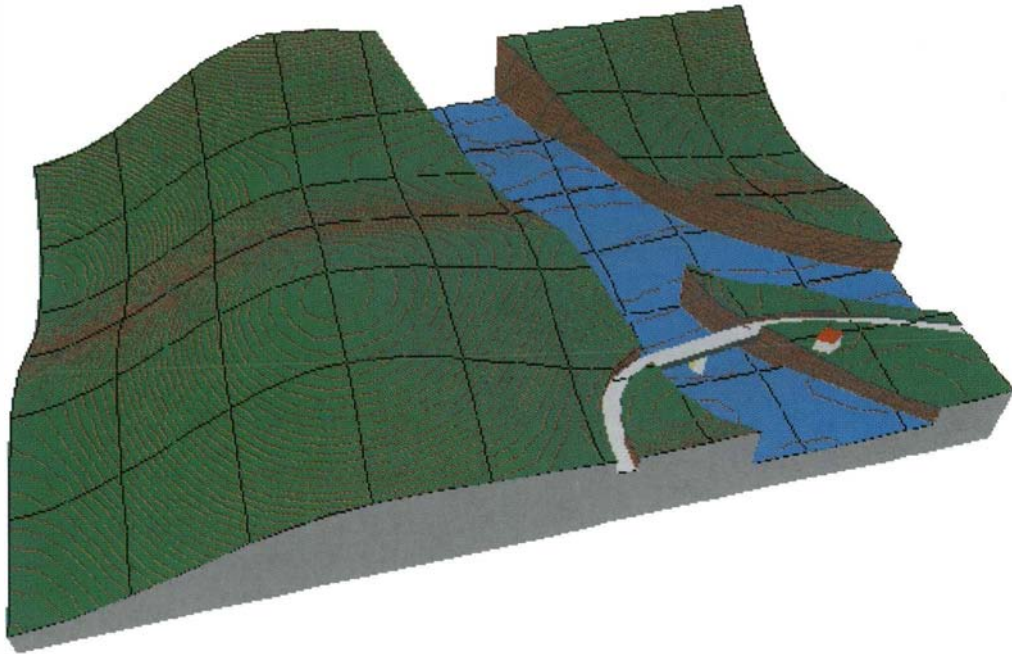
- les fichiers de données qui permettent d'exploiter le MNT ne contiennent aucun triangle et sont très réduits en taille : le MNT est structuré dès l'origine. Les triangles n'apparaissent qu'en tant qu'auxiliaires de calcul et en nombre minimal, car ce sont finalement des triangles curvilignes (dont le nombre est fonction des paramètres de la projection et des souhaits de l'utilisateur) qui dessinent la surface,
- la méthode permet, en principe, de tenir compte de tout type de discontinuité,
- sur chaque région la surface du MNT est lisse,
- le MNT est maillé avec un pas fonction du relief (entre 25 et 150 m pour les données issus de la BD Topo) ; les arcs de discontinuité coupant un carreau sont découpés au moment de l'exploitation ; le bâti de même ; ceci permet de résoudre très vite le problème des parties vues et cachées,
- le MNT est structuré : une structure principale de relief lisse couvrant en principe la plus grande partie de l'emprise, des structures secondaires de relief lisse également sur les carreaux coupés par les arcs de discontinuité, une structure de bâti.

La distinction entre structure principale et structures secondaires permet de modifier localement et de façon radicale le relief.

C'est ainsi qu'ont été créés sur le MNT-test (figures B.3.8, B.3.9 et B.3.10), successivement, l'estuaire, puis une première portion de route encaissée, puis une seconde, ceci se faisant en ne modifiant que le fichier des structures secondaires qui comporte, d'une part, les arcs-standards définissant les régions avec leurs couleurs, d'autre part, pour

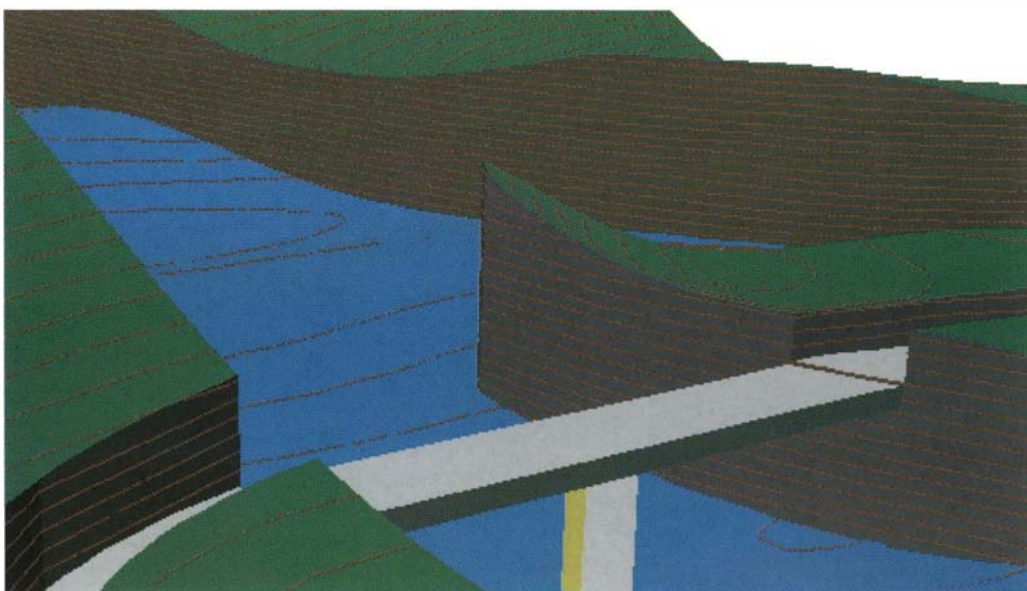
chaque carreau concerné, et dans l'ordre naturel des régions de ce carreau, les quatre quadruplets  $z$ ,  $z'x$ ,  $z'y$ ,  $z''xy$  définissant le relief de la région.

L'introduction d'accidents de relief de ce type serait délicat sur un MNT non structuré ; rappelons, pour conclure, que la méthode repose en définitive sur cette remarque simple que sur un rectangle toutes les régions délimitées par des discontinuités peuvent être univoquement rangées dans un ordre naturel qui au fond généralise la notation matricielle ligne-colonne.

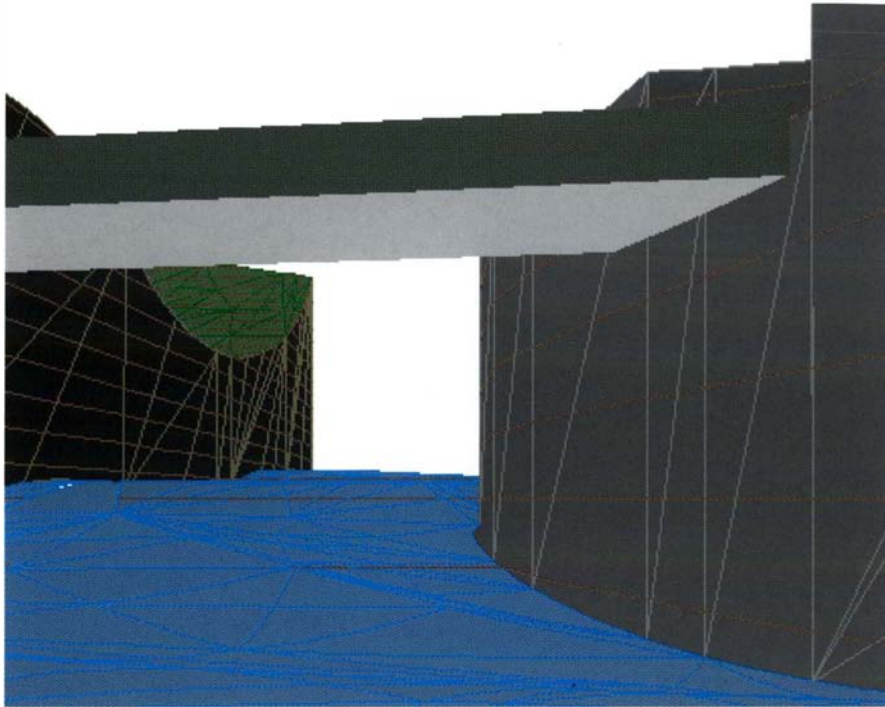


**figure B.3.8**

*MNT avec discontinuités de première espèce : un estuaire bordé de hautes falaises verticales ; une route encaissée le franchit sur un pont ; une maison apparaît à droite ; la surface de l'eau est ondulée ; le carroyage est dessiné ; le pas du MNT est de (200/3) mètres ; l'équidistance des courbes de niveau est quatre mètres.*



**figure B.3.9** : même MNT que sur la figure précédente ; détail.



*figure B.3.10 : ici sont représentés les triangles curvilignes sous-jacents*

## Références

[HABIB 97] Mohammed Habib : *Étude par simulation de la précision altimétrique et planimétrique d'un MNT obtenu par corrélation d'images spatiales. Précision d'un MNT régulier. Erreur de rendu d'un semis régulier. Description d'une structure de MNT régulier*, IGN-ENSG, 1997.

[KUBIK, BOTMAN] Kubik et Botman : *Interpolation accuracy for topographic and geological surfaces*, Congrès de Helsinki (SF), Commission III, ISPRS.



# B.4 Relations entre précision radiométrique et précision géométrique en imagerie numérique

Christian Thom

## Introduction

Un des premiers problèmes auquel se trouve confronté l'utilisateur d'images numérisées est celui de la taille du pixel qu'il va utiliser pour son scannage. Intuitivement, il sent bien que, plus petit sera le pas de scannage, meilleure sera la précision, au moins relative, du résultat, au prix malheureusement d'un volume de données plus important. Mais il ne sait en général pas que cette plus grande résolution se paye aussi, nous le verrons, en terme de qualité radiométrique.

Cette perte de précision radiométrique a aussi une conséquence indirecte mais certaine sur la précision géométrique, qui est l'objet de cet article. On sent bien que, selon le principe que " qui peut le plus, peut le moins " (on peut toujours rassembler des petits pixels pour en faire des gros...), on ne risque quand même pas de paradoxalement obtenir un moins bon résultat avec des petits pixels qu'avec des gros. Mais comme la taille finalement choisie est toujours le résultat d'un compromis entre la précision géométrique et le coût/volume de donnée/temps de traitement/etc., il est clair que l'on doit tenir compte de l'effet de la radiométrie sur la géométrie pour trouver le bon compromis.

Ce qui est vrai pour les images numérisées l'est encore plus pour les images directement numériques, c'est-à-dire issues de caméras numériques, et cela de deux façons. Premièrement, la meilleure résolution géométrique se paye beaucoup plus cher, car elle intervient directement, et à peu près linéairement, sur le coût de la prise de vue : il ne s'agit pas, là, d'un simple réglage de scanner, mais s'apparente plutôt au choix de l'échelle de prise de vue dans le cas classique.

Deuxièmement, la qualité radiométrique des images numériques est bien meilleure que celle des images numérisées (dans les conditions habituelles de numérisation). On comprend bien alors que l'effet précité est encore plus crucial dans ce cas.

Une mauvaise radiométrie a évidemment des effets sur d'autres aspects que la précision géométrique, par exemple l'esthétique et l'interprétabilité de l'image ; ils sortent du cadre de cette étude car ils sont trop subjectifs pour être modélisés de manière un peu rigoureuse. Pourtant, ils ne lui sont pas complètement étrangers car la précision géométrique que l'on peut atteindre dans une image a certainement une influence sur son interprétabilité, et peut-être sur son esthétique.

Nous verrons que ces problèmes sont assez compliqués, et ont beaucoup d'aspects. Nous ne visons pas ici à une étude exhaustive de tous les cas, mais plutôt à une analyse de certaines situations simples, pour nous aider à *comprendre* la nature des phénomènes rencontrés.

## La précision radiométrique

Cette notion est relativement simple. La radiométrie est la mesure des énergies émises par les objets d'une scène. Sa précision est donc bien définie, comme pour toute mesure. Toutefois, dans le contexte de cette étude, la radiométrie en elle-même ne nous est pas toujours accessible.

En effet, si les capteurs d'images numériques sont presque toujours radiométriques, ce n'est pas le cas du film numérisé, où les données numériques de l'image sont des fonctions de la radiométrie, croissantes et bornées, mais mal connues, et qui, de plus, dépendent des conditions de développement de l'émulsion. Heureusement, cela n'aura que peu d'impact sur notre étude, car nous cherchons à évaluer la précision de localisation de détails visibles dans des images, et que celle-ci sera toujours fonction du rapport entre le bruit et le contraste du détail, qui pourront être évalués plus ou moins directement dans l'image.

Si la notion est simple, son estimation l'est moins, surtout dans le cas des images numérisées. Si, en effet, les modèles de bruit sont bien connus pour les capteurs numériques, ils le sont peu dans le cas des numérisations, où se superposent le bruit du scanner, les bruits liés à l'émulsion et à son traitement. Ici, nous nous servirons de données que nous avons acquises d'expériences et de mesures sur notre caméra numérique. Toutefois, il faut nous interroger sur l'origine de ces bruits, car certains aspects ont un impact sur notre étude.

## Caméra numérique

Le modèle de bruit est ici très simple. Les deux sources de bruits sont :

- le bruit de lecture du capteur, dû à l'électronique de numérisation, essentiellement gaussien,
- le bruit de photon, dû à la nature corpusculaire de la lumière, poissonnien,
- les différences de sensibilité des pixels (rectifiable),
- les différences de courant d'obscurité (rectifiable aussi).

En général, c'est le bruit de photon qui domine. Il croît en racine carrée du signal, et sa valeur dépend du nombre total de photons que peut contenir chaque pixel. Par exemple, dans le cas du capteur KODAK que nous utilisons, ce nombre vaut 85,000. Le rapport signal/bruit à pleine exposition vaut donc 300.

## Images digitalisées

Les sources de bruits sont ici plus nombreuses et moins bien connues :

- bruit issu du numériseur. Il dépend du matériel employé, de la taille de pixel, du niveau de gris obtenu, etc,
- bruit provenant de l'émulsion.

Voyons plus en détail ce dernier. On sait que le processus photographique est basé sur une détection de la lumière par des ions argent, puis à une amplification du signal par le révélateur, qui fait croître chaque germe créé par un photon détecté en un grain d'argent d'une certaine taille (quelques microns). Le film est ensuite analysé par le numériseur qui évalue sa densité optique, c'est-à-dire en fait la proportion de lumière qui passe entre les grains d'argent.

On voit tout de suite de nombreuses conséquences :

- la réponse du film n'est pas linéaire. En effet, le processus photochimique de production des grains n'est pas linéaire, car il faut plusieurs photons pour qu'un grain puisse être créé, provoquant une insensibilité du film pour les basses illuminations. Mais même si l'on supposait ce processus linéaire, lorsque la densité des grains d'argent croît, ils finissent par se "faire de l'ombre", lorsque un grain en occulte un autre. La sensibilité marginale pour une proportion de grain  $R$  sera de  $1 - R$ . Cela nous donne une courbe de réponse en fonction de l'illumination :  $i$  de  $R(i) = 1 - \exp(-k \cdot i)$ . La densité optique, qui est proportionnelle au logarithme de  $1 - R$  est donc bien proportionnelle aussi à l'illumination de l'émulsion,
- si on se place à la moitié de la dynamique du film ( $R = 1/2$ ), pour une taille de pixel d'analyse  $S$  et une taille caractéristique de grain de  $s$ , si  $i$  est exprimé en nombre de photons détectés, on a :

- surface du pixel :  $S^2$

- surface du grain :  $s^2$

- pour  $i$  faible, on constate que  $k = s^2/S^2$

- pour  $R = 1/2$ ,  $i = \log(1/R)/k = \log(2) * S^2/s^2$

le rapport signal sur bruit est :  $r = \sqrt{i} = \sqrt{\log(2)} * S/s$ .

Prenons pour exemple les valeurs suivantes :  $S = 20 \mu$ ,  $s = 1 \mu$ , on a alors  $r = 16,6$ . Rappelons que dans des conditions similaires, un capteur directement numérique bénéficie d'un rapport signal/bruit d'environ 150. Cela donne une idée du problème ... Au vu des valeurs obtenues, il nous paraît justifié de négliger pour ce qui suit le bruit propre au scanner, d'autant que nous ne le connaissons pas, et qu'il dépend du type d'appareil utilisé.

De plus, on remarque sur cette formule que  $r$  est proportionnel à la dimension de la tache d'analyse. En général, la tache d'analyse sur un scanner est plus grande que le pas d'échantillonnage, pour éviter le repliement de spectre, ce qui améliore un peu le chiffre ci-dessus, au prix d'une moins bonne FTM (Fonction de Transfert de Modulation) bien sûr.

Enfin, cette formule nous donne une idée du rapport des rendements quantiques du film et des capteurs DTC. En effet, notre expérience nous montre que les conditions de prise de vue (temps d'exposition, rapport d'ouverture) entre les deux systèmes sont pratiquement les mêmes. On voit que sur un pixel de  $20 \mu$ , le film détecte 280 photons, alors que sur un pixel de  $9 \mu$ , le DTC en détecte 20 000 environ, ce qui correspond à un rapport de sensibilité de 350 ....

Ces équations très simples (voire simplistes...) nous expliquent pourquoi les capteurs DTC peuvent être plus petits que les fonds de chambres habituels, et que leurs pixels sont eux-mêmes plus petits, mais qu'ils gardent malgré tout un énorme avantage en terme de qualité radiométrique. Tout le problème est de l'exploiter au mieux, pour compenser leur relatif manque de résolution.

## La précision géométrique

Nous nous intéresserons ici à la précision géométrique dans l'image, et non à celle des objets dans la scène. Cela veut dire que nous ferons abstraction de tous les problèmes de systématismes liés à la prise de vue, bien que ceux-ci puissent être importants, pensons au cas des caméras aériennes basées sur l'usage de capteurs linéaires par exemple, où la mauvaise connaissance des paramètres d'orientation externe du capteur induit pour chaque ligne de l'image une mauvaise précision de localisation des pixels.

On peut distinguer deux notions différents dans ce domaine. Tout d'abord la précision de positionnement d'un détail dans l'image, ce détail pouvant être ponctuel, linéaire, ou surfacique, celui-ci se ramenant en général au linéaire car on en positionne les limites.

De même le ponctuel est souvent l'intersection de deux détails linéaires (coins de bâtiment, par exemple), bien qu'il y ait aussi des détails purement ponctuels. Le fait que le détail soit en général réparti sur plusieurs pixels favorise évidemment sa localisation, car on peut avoir plusieurs estimations de la mesure de position, et donc en faire une moyenne.

Ensuite, il y a le problème plus délicat de la séparation de deux détails proches, ou résolution, qui touche plus l'interprétabilité de l'image que la précision elle-même, mais que nous mentionnons ici car elle est beaucoup plus exigeante en terme de taille de pixel.

En effet, il est clair que même avec des images de très bonne qualité, il est impossible de séparer des détails qui sont distants de moins de deux pixels, alors qu'en terme de précision de localisation, on peut sans difficulté, dans les mêmes conditions, viser les quelques dixièmes de pixels.

Si la taille du pixel est un élément évidemment déterminant de cette précision, elle n'est pas la seule. La résolution de l'optique en est un autre.

Toutes sortes de situations peuvent se présenter entre deux extrêmes :

- images floues échantillonnées avec des pixels trop petits,
- images très résolues sous-échantillonnées avec des pixels trop gros.

Le premier et le deuxième cas peuvent se présenter, par exemple, avec un scanner mal conçu ou mal réglé, et le deuxième avec des caméras numériques ayant une optique inadaptée. Cet éventail inclut évidemment la situation idéale des images échantillonnées en respectant la limite de Shannon, mais cela est très rare, car la réponse des optiques n'est pas constante dans l'ensemble de leur champ, et donc un échantillonnage régulier ne permet de respecter Shannon partout.

On est donc en général confronté à une situation non-idéale, et en général, même inconnue avec précision, ce qui rend notre étude particulièrement ardue. Nous nous bornerons donc à examiner quelques cas typiques simples, en général aux extrêmes de la gamme des possibles, les situations intermédiaires étant toujours plus compliquées.

## Précision de localisation

### Cas des images sous-échantillonnées

En ce qui concerne les détails ponctuels, la précision est là toute trouvée : il n'y a aucun moyen de déterminer la position du détail à l'intérieur de son pixel. D'où une précision RMS en x et y de 0,29 pixel, indépendante de la précision radiométrique.

Dans le cas d'un détail linéaire, la précision que l'on peut obtenir dépend de la connaissance *a priori* de la nature du détail (est-il rectiligne ?), et de son orientation par rapport aux axes de l'image. Le pire cas est évidemment un détail parallèle à un des axes de l'image, et on obtient la même précision de 0,29 pixel RMS.

Par contre, si on a affaire à un détail orienté différemment, la répartition de l'énergie dans les différents pixels traversés par le détail permet de remonter à une meilleure précision, qui dépend alors de la dimension caractéristique du détail pour laquelle on peut le considérer comme rectiligne. Puisqu'on se sert de la valeur des pixels traversés, la précision radiométrique aura une importance, difficile à évaluer.

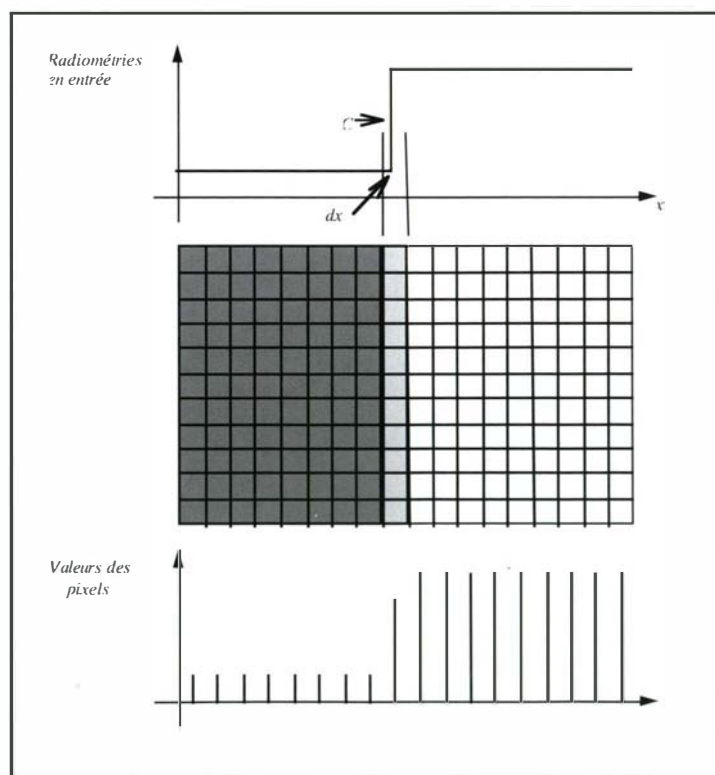


figure B.4.1: limite de zone, cas sous-échantillonné

En ce qui concerne les détails surfaciques, le problème se résume à positionner le bord de la surface. Cette situation, heureusement plus fréquente que la précédente (champs, routes, bâtiments, etc.), est plus favorable, car la position sub-pixellaire du bord est fonction de la quantité d'énergie reçue par le pixel contenant le bord.

En prenant pour simplifier un bord parallèle à l'axe y, de contraste c, on comprend que sa position sub-pixellaire en x peut être calculée par :  $dx = dg/c$ , dg étant la différence de radiométrie par rapport au pixel de référence. La précision sur x est donc directement liée au bruit radiométrique.

Pour fixer les idées, avec un contraste de 1/10 normalisé à la valeur de saturation du capteur, on obtient dans le cas du film numérisé à 20 µ un bruit RMS de 0,6 pixel, ce qui signifie que ce n'est pas la peine d'approfondir, et dans le cas du capteur numérique 1/15 = 0,07 pixel, ce qui est appréciable.

Poussons un peu plus loin le problème du film. En effet, que va-t-on gagner à utiliser des pixels plus petits à la numérisation ? Le bruit croît en 1/S, et donc si l'on ne s'intéresse qu'à un pixel, la précision sera donc la même quelque soit S. Heureusement, il faut tenir compte du fait que pour une unité de longueur du détail, on peut moyenniser les évaluations de la position du détail autant de fois qu'il contient de pixels.

On aura donc *in fine*, une précision proportionnelle à  $s \cdot \sqrt{S/L/c}$ , où L est la dimension utilisable du détail.

En fait, on ne peut diminuer indéfiniment la taille du pixel sans atteindre la limite de résolution de l'optique, et donc passer dans le cas suivant.

### Cas des images sur-échantillonnées

Nous étudions ici le cas où toute transition de radiométrie se fait progressivement. Tout détail est donc représenté sur plusieurs pixels. Là, l'ensemble des cas précédents se réduit formellement au cas d'un bord.

En effet, un détail linéaire se comporte comme deux bords successifs, leur dimension caractéristique étant toutefois la moitié de celle d'un bord (la transition d'un bord est en fait l'intégrale de celle d'un détail linéaire, qui est la fonction d'étalement de point (FEP) projetée sur l'axe perpendiculaire au détail).

Nous nous intéresserons donc à la localisation d'une zone de gradient constant de largeur D et de longueur utile L. La grandeur D est liée à la largeur de la FEP de l'optique. On peut considérer que c'est la largeur à mi-hauteur de celle-ci dans le cas du bord d'un détail surfacique, et de la moitié de celle-ci pour un détail linéaire. Une fois de plus, constatons la rusticité de notre modèle, qui sera néanmoins suffisant pour analyser de manière qualitative le problème.

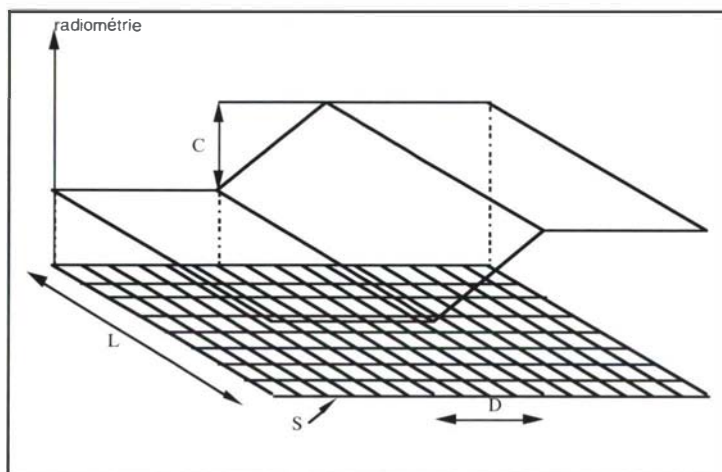


figure B.4.2 : limite de zone, cas sur-échantillonné

La position précise (sub-pixellaire) en x est donnée par la valeur moyenne de la zone où le gradient est constant, divisée par ce gradient, soit :

$$dx = \frac{\sum g}{L \cdot D} \cdot S^2 \cdot \frac{D}{C} = \frac{\sum g}{L} \cdot \frac{S^2}{C}$$

Le bruit sur cette valeur est de :

$$\sigma_x = \sigma_g \cdot \frac{S}{\sqrt{L \cdot D}} \cdot \frac{D}{C} = \sigma_g \cdot \frac{S}{C} \cdot \sqrt{\frac{D}{L}}$$

Là encore, dans le cas d'un cliché numérisé, la taille de pixel S intervient aussi dans  $\sigma_g$  au dénominateur, et  $\sigma_x$  se retrouve donc indépendant de celle-ci, mais est fonction en revanche de la taille des grains.

Il faut remarquer qu'on ne peut abuser du paramètre  $L$ . En effet, il est rare que l'on puisse supposer qu'un détail est linéaire sur une grande longueur. De plus, nous avons supposée connue son orientation, ce qui n'est en général pas le cas, et qui introduit une inconnue supplémentaire, et donc plus d'imprécision.

Rappelons que dans le cas du détail linéaire, l'évaluation de la position peut se faire aussi avec l'autre côté du détail, et que  $D$  est la moitié du cas précédent ; on gagne ainsi par rapport au bord un facteur 2 au total.

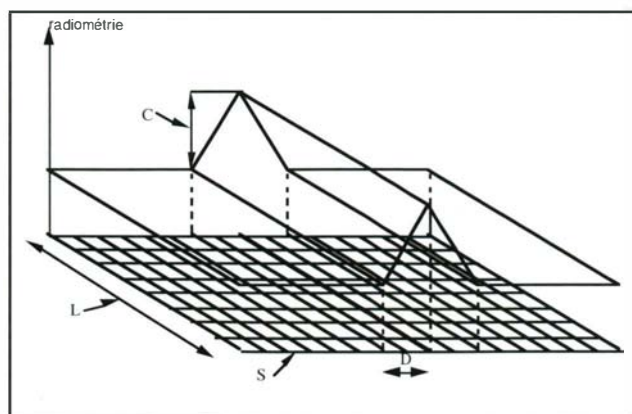


figure B.4.3 : détail linéaire, cas sur-échantillonné

## Cas général

En fait, dans la pratique, on est confronté le plus souvent à des situations intermédiaires, où la fonction d'étalement de point de l'optique est de l'ordre du pixel, ou d'une fraction de pixel, n'est pas connue avec précision, varie d'un point à un autre, etc.

Les méthodes de positionnement précis inspirées de celle ci-dessus donnent dans ce cas des résultats médiocres et entachés de biais. Cela est dû au fait que la fonction d'étalement de point est elle-même mal échantillonnée. Pourtant elles amènent toujours une amélioration par rapport à la situation vue au paragraphe " Cas des images sous-échantillonnées " (page 37), dont les résultats peuvent donc être considérés comme des majorants des erreurs.

## Conclusions

On peut tirer plusieurs conclusions de ce que nous venons de voir :

- le fait de travailler avec des images bien échantillonnées est important si l'on veut profiter pleinement de ce genre de technique,
- toutefois, pour positionner le bord de détails surfaciques, un mauvais échantillonnage est suffisant,
- l'emploi de ce genre de technique sur des clichés numérisés est inutile, sauf pour des détails très contrastés, le bruit dans ce type d'images étant trop important.

## Résolution spatiale

### Détection des détails fins

Nous nous éloignons un peu de notre propos, car il ne s'agit pas ici à proprement parler de précision géométrique d'un détail, mais de détection de celui-ci. Nous nous permettons cet écart car la détection prime bien évidemment la précision ....

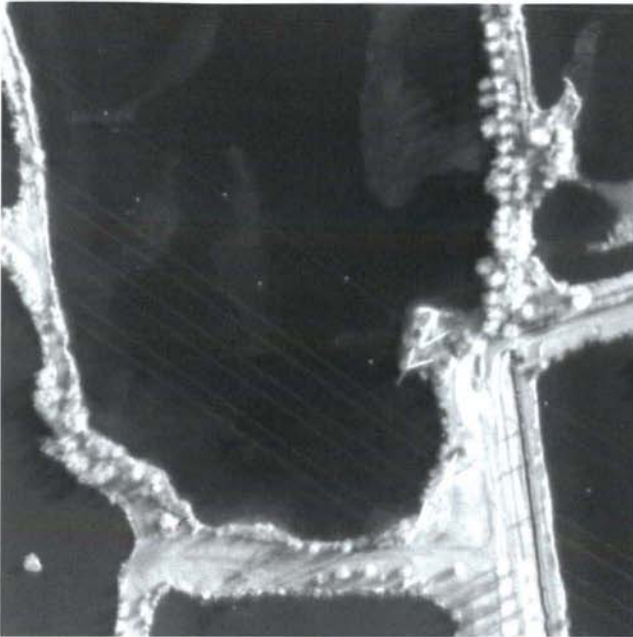
Contrairement à ce que l'on croit communément, il n'est pas impossible de voir dans une image des détails bien plus petits que la taille du pixel. Il suffit pour cela que le contraste du détail, multiplié par le rapport de la surface occupée par le détail à la celle du pixel soit suffisant par rapport au bruit radiométrique.

Un exemple de cette propriété est donné figures B.4.4 et B.4.5. Il s'agit d'images prises sur la même zone, un étang sur lequel passent plusieurs lignes à haute tension. La figure B.4.4 est un extrait d'image provenant de la caméra numérique de l'IGN.

La figure B.4.5 est un cliché numérisé. Les tailles de pixel sol sont semblables, de 75 cm.

Sur ces deux extraits, on distingue les câbles de la ligne la plus grosse (probablement doublée), mais la ligne la plus fine n'est visible que sur l'image numérique. La section des câbles n'est pourtant que de trois centimètres, c'est-à-dire de l'ordre du 1/20 ième de la taille du pixel !

On voit que là aussi, un bon rapport signal sur bruit dans les images permet de compenser une mauvaise résolution géométrique.



**figure B.4.4 : caméra numérique**



**figure B.4.5 : image scannée**

## Pouvoir de séparation

Il semble au premier abord ici que la qualité radiométrique ne peut en rien compenser une mauvaise résolution géométrique. En effet, deux détails situés dans le même pixel ne pourront jamais être séparés. Cette proposition est indéniable, mais il faut toutefois la nuancer.

On peut prendre le problème dans l'autre sens, c'est-à-dire s'interroger sur le pouvoir séparateur réel d'images dont la qualité radiométrique est insuffisante. On dit traditionnellement que l'on peut discerner deux détails (choisissons-les brillants, par exemple) s'ils sont séparés dans l'image par des pixels sombres.

Il est clair que dans le cas de détails peu contrastés, et dans des images de mauvaise qualité, les pixels censés être clairs à cause de la présence des détails auront une certaine chance d'être assombrés par le bruit, de même que le pixel qui les sépare aura lui la possibilité, au contraire, d'être éclairci.

La situation inverse peut aussi se présenter, où un objet sera faussement dédoublé. On voit que l'on rejoint ici le problème de la segmentation, puisqu'on pose la question : " Ce pixel appartient-il à cet objet ? ".

Étudions donc, par exemple, un cas concret : la segmentation de zones supposées homogènes. Nous choisissons à dessein un algorithme simple, où un seuil sur les radiométries détermine l'appartenance à une zone ou à une autre. Si le contraste entre les deux zones vaut  $c$ , le seuil sera placé à  $c/2$  (on suppose le bruit indépendant des radiométries).

Quelle est dans ces conditions la probabilité qu'un pixel soit mal classé ? C'est un problème simple de statistiques, lié à l'intervalle de confiance.

La réussite du processus de segmentation et sa précision, dépendront évidemment de ce paramètre, de manière hélas non triviale fonction de l'algorithme utilisé, et des connaissances a priori que l'on a des structures dans l'image (bords rectilignes, par exemple).

On voit dans les figures B.4.6 et B.4.7 la même zone dans deux prises de vue simultanées, l'une avec un caméra numérique, l'autre avec une caméra traditionnelle. Si l'on porte son attention sur les pans de toit, on remarque qu'ils sont clairement délimités dans l'image numérique, alors que certaines arêtes sont indiscernables sur l'image scannée.

Cette perte de visibilité aura évidemment des conséquences sur la précision de sa restitution, notamment avec des moyens automatiques. Il est malheureusement impossible de la quantifier ici, car elle dépend évidemment des algorithmes utilisés.

On peut voir, par exemple, le résultat du filtre d'extraction de contour de Adobe Photoshop. Il apparaît clairement que l'extraction des arêtes de toits pourrait se faire plus facilement et plus précisément sur l'image numérique. Remarquez aussi le bord des routes dans les régions ombragées.

Pour illustrer encore mieux l'influence de la qualité radiométrique et ses interactions avec la géométrie, observons les figures B.4.10 et B.4.11 : la même image est ici présentée, mais après avoir été sous-échantillonnée d'un facteur 2. Cette opération, comme elle moyenne des pixels, diminue le bruit, et on voit que le processus d'extraction des contours marche maintenant mieux, mais son résultat sera évidemment moins précis, car obtenu avec un pixel deux fois plus gros.

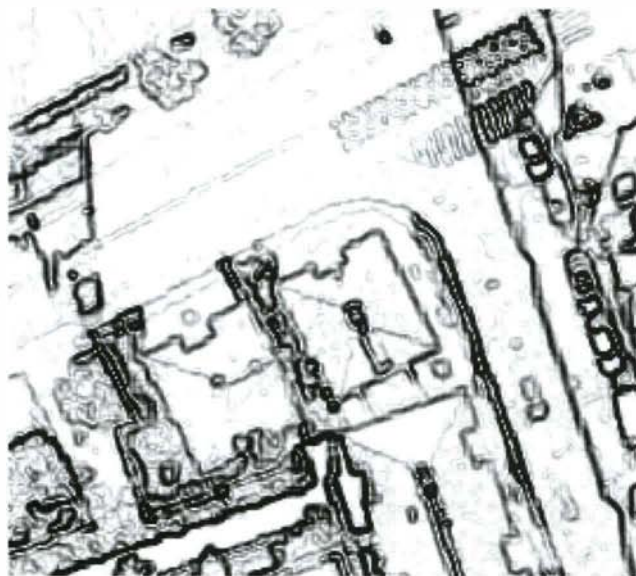
Nous n'avons pas ici mentionné la question de l'échantillonnage dans les images, mais il a aussi bien sûr une influence. Lorsque la FEP est plus grande que le pixel, le contraste entre deux détails proches a tendance à s'atténuer, et donc la restitution des deux détails sera plus sensible au bruit. Lorsqu'elle est plus petite, on ne constate pas d'effet notable.



*figure B.4.6 : caméra numérique*



*figure B.4.7 : image scannée*



*figure B.4.8 : caméra numérique, contours*



*figure B.4.9 : image scannée, contours*



*figure B.4.10*  
*Image scannée sous-échantillonnée.*



*figure B.4.11*  
*Contours extraits de la figure B.4.10.*

## Conclusion

Il est clair que pour ce qui concerne la résolution géométrique, la qualité radiométrique n'apporte que peu de choses, sauf en ce qui concerne la détection des détails. Elle n'a une influence sur la séparation que dans le cas de détails faiblement contrastés, c'est-à-dire dont le contraste est du même niveau que le bruit présent dans l'image. Il faut pourtant signaler que ces détails sont plus fréquents qu'on ne le pense dans les zones urbaines, les matériaux de construction étant souvent d'albédos proches (différents types d'enrobé, par exemple), et les zones d'ombre fréquentes.

## Conclusion

L'impact de la qualité radiométrique sur la qualité géométrique n'est pas toujours facile à évaluer. Le problème est d'ailleurs compliqué par le fait qu'il dépend des algorithmes employés pour la restitution, et de l'adéquation de l'échantillonnage des images. Pourtant, il est réel dans la plupart des cas. Une étude plus précise et plus rigoureuse, plus scientifique en un mot, que la trop sommaire présente serait certainement nécessaire, surtout si l'usage des capteurs numériques se répandait, car c'est surtout leur excellente qualité radiométrique qui la motive. On a vu en effet que, dans le cas de clichés numérisés, les gains en précision à espérer de techniques exploitant ces idées sont quasi nuls.



# B.5 Télémétrie laser aéroportée pour la surveillance des mouvements verticaux du sol (TAMS) : résultats de la première campagne aérienne

Olivier Bock

## Introduction

La télémétrie laser aéroportée à champ large, pour la surveillance des mouvements verticaux du sol (TAMS) est une nouvelle technique de géodésie développée à l'IGN, en collaboration avec l'École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) et, initialement, Elf Aquitaine [BOCK 95], [BOCK 99].

Son objectif est la mesure de phénomènes de subsidence terrestre de faible amplitude (~1 mm), en un laps de temps très court (~1 heure), dans un réseau d'une centaine de cibles terrestres réparties sur une surface d'environ 10 x 10 km<sup>2</sup>. À l'heure actuelle, aucune autre méthode de géodésie, tant classique (nivellement, triangulation, etc.) que moderne (GPS, DORIS, SAR, etc.), ne permet de satisfaire à l'ensemble de ces contraintes.

Notre technique s'apparente aux systèmes aéroportés et spatiaux qui ont été étudiés par la NASA dans le passé, [KAHN 80], [KAHN 82], [COHEN 87], mais qui n'ont jamais vu le jour car ils étaient trop complexes d'un point de vue instrumental. Notre système utilise un faisceau laser fortement divergent (champ large) qui produit au sol une empreinte de grand diamètre et permet, pour une impulsion laser émise, de recevoir plusieurs échos des cibles au sol (rétro-rélecteurs optiques de type "coins de cube").

L'avantage du champ large est, d'une part, de simplifier considérablement l'instrumentation (une simple lentille divergente au lieu de plusieurs faisceaux laser à asservir) et, d'autre part, de pouvoir réaliser des mesures de distances rigoureusement synchrones (de cinq à dix, en fonction du nombre de cibles dans le champ). Ceci permet ensuite d'ajuster la position du véhicule (avion transportant le télémètre) en même temps que l'on ajuste les positions relatives des cibles entre elles (principe de la multilatération).

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle génère beaucoup de superpositions d'échos, qui sont de ce fait, inutilisables pour l'ajustement. L'estimation des distances avion - cibles, à partir du signal laser, ainsi que l'estimation des positions relatives des cibles nécessitent donc la mise au point de techniques robustes.

Plusieurs étapes de validation ont été menées jusqu'à présent. Une première campagne de mesure a été réalisée à Saint Etienne de Tinée (août 1995), qui a permis de tester un premier prototype monté dans un véhicule terrestre (camionnette) [BOCK 95]. Ensuite, une seconde campagne (Combs la Ville, décembre 1995) a permis de valider les méthodes d'estimation, toujours dans une configuration terrestre [BOCK 96], [BOCK 98a], [BOCK 99a].

À partir d'analyses théoriques validées par ces expérimentations terrestres, des simulations aériennes ont été menées pour extrapoler ces résultats [BOCK 99b]. Il a été montré que les performances ultimes de la technique dépendaient essentiellement du bilan de liaison de l'instrumentation, du nombre de mesures et de la taille du réseau.

Les paramètres tels que l'altitude de l'avion, la divergence du faisceau et la densité de cibles au sol n'agissent qu'au second ordre. De plus, la scintillation due à la turbulence atmosphérique n'a qu'un effet marginal sur la précision finale.

Une expérimentation aérienne a été réalisée en mai 1998 avec l'Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection (ARAT) de l'IGN, en collaboration avec l'INSU. Initialement nous avions un créneau de quinze jours au mois de mars, mais il n'a pas suffi pour l'installation, la mise au point du matériel dans l'avion et la réalisation de vols concluants (pannes, grèves du contrôle aérien, météo défaillante, etc.).

Nous avons pu bénéficier d'un autre créneau, en mai, et en avons profité pour également changer de site et choisir une ancienne base aérienne près de Chartres, plus commode d'accès au sol et de survol. Le traitement des données de cette campagne a nécessité d'importantes modifications des algorithmes existants pour prendre en compte la spécificité des conditions expérimentales (réseau de petite taille).

Ce sont principalement ces aspects que nous allons développer dans cet article, en tentant d'une part de démontrer que les résultats obtenus sont compatibles avec l'attente d'un point de vue théorique et, d'autre part, en tirant des conclusions sur les améliorations possibles de la méthode.

## Caractéristiques de l'expérimentation

### L'instrumentation du réseau au sol

Pour cette expérience, nous disposons d'une surface au sol d'environ 1 km<sup>2</sup>, sur l'ancienne base aérienne de Crucey (Eure et Loir, France) (cf. figures B.5.1 et figures B.5.2, pages 44 et 45). Afin de se placer dans des conditions réalistes, nous avons installé au sol un réseau de soixante-quatre réflecteurs, dont l'espacement était donc relativement faible (150 mètres).

Les réflecteurs étaient des coins de cubes de six centimètres de diamètre, montés à l'extrémité de tubes en PVC, eux-mêmes ancrés dans le sol au moyen d'embases en acier. Les positions approchées (~5 cm) de ces réflecteurs ont été relevées par GPS en mode cinématique, par une équipe de l'ESGT.

Le terrain a également été équipé de trois stations météo (pression, température, humidité) et d'un anémomètre sonique (prêté par l'INRA), afin de pouvoir trouver d'éventuelles corrélations entre les mesures de distances et des variations météorologiques locales et la turbulence atmosphérique.

## L'instrumentation de l'avion

Le laser utilisé était un laser picoseconde à modes bloqués de l'ESGT, délivrant 90 mJ à 1 064 nm dans une impulsion de 50 ps, à une cadence de 10 Hz. Ce laser est une version spéciale du BMI 5022 DPS 10, monté sur un banc amorti Newport, avec un échangeur eau/air.

Des amortisseurs supplémentaires (basses fréquences) ont été montés entre le laser et l'avion. Le faisceau laser a été guidé à l'extérieur de l'avion par une interface montée en remplacement de la trappe photographique arrière, avant de passer par des lentilles divergentes assurant la divergence du faisceau.

Pour cela, deux lentilles divergentes ont été associées : -29,1 mm de focale pour la première et soit -30,6 mm, soit -57,4 mm pour la seconde (produisant des divergences comprises entre 15 et 20° de demi-angle). Initialement il était prévu de passer par la trappe photographique avant, mais la présence des antennes radio de l'avion perturbait notre système.

Du fait de la densité de cibles assez élevée, il a fallu réduire le temps de réponse de l'étage de détection du télémètre laser. Une approche d'optimisation de l'ensemble photodiode-amplificateur a été réalisée, notamment avec l'essai de nouvelles photodiodes plus rapides et d'amplificateurs opérationnels bas bruit / large bande [BOCK 98b].

Ainsi, l'association d'une photodiode plus rapide (Advanced Photonix, SD 290), de surface active plus faible (42 mm<sup>2</sup>), et d'un amplificateur vidéo de 800 MHz de bande passante (Analog Devices, AD8001), a permis d'atteindre une bande passante finale de 26 MHz et une réponse impulsionnelle d'un temps de montée de 2,8 ns et de durée à mi-hauteur de 7 ns. Ceci au prix d'une sensibilité diminuée globalement d'un facteur 6 par rapport à l'instrument initial [BOCK 96]. Globalement, la transimpédance du système était ainsi de 500 V/A.

Le signal issu de l'étage de détection était échantillonné à l'aide de l'oscilloscope numérique LeCroy 7200 à 1 Géch./s et transféré sur un PC portable par GPIB. Ce PC était également équipé d'une carte de conversion A/N pour l'échantillonnage de signaux issus de capteurs météorologiques (pression, température, humidité) installés par l'INSU à l'extérieur de l'avion. La trajectoire de l'avion a été mesurée par GPS (données enregistrées sur un PC et traitées par la suite), mais l'attitude de l'avion n'a pas été mesurée.



**figure B.5.1**

(a) : base aérienne de Crucey, équipée avec un réseau de soixante-quatre réflecteurs,  
 (b) : vue des instruments et opérateurs dans l'ARAT (Fokker-27).

## L'acquisition des données

Une altitude trop élevée de l'avion aurait donné lieu à beaucoup de superpositions d'échos, elle a donc été plafonnée à 1 600 m au-dessus du sol. La plupart des données ont été acquises à deux paliers différents : 900 m et 1 200 m, des altitudes plus élevées ne donnant quasiment pas de réponse (limite de détection) et des altitudes plus basses ne produisant pas assez d'échos par tir (trop peu de cibles dans le champ). Le plan de vol préétabli était composé de deux séries orthogonales de six bandes parallèles (cf. figure B.5.2).

Deux missions, d'environ quatre heures, ont été réalisées les 13 et 14 mai 1998. Le tableau B.5.2, page 47, en indique les caractéristiques. La vitesse de l'avion au-dessus du réseau a été réduite au minimum, soit environ 90-100 m/s, afin de maximiser les temps d'acquisition. Ceci a permis de collecter environ 6 000 tirs laser utiles au total.

Pour chaque bande, les données acquises dans l'avion étaient composées :

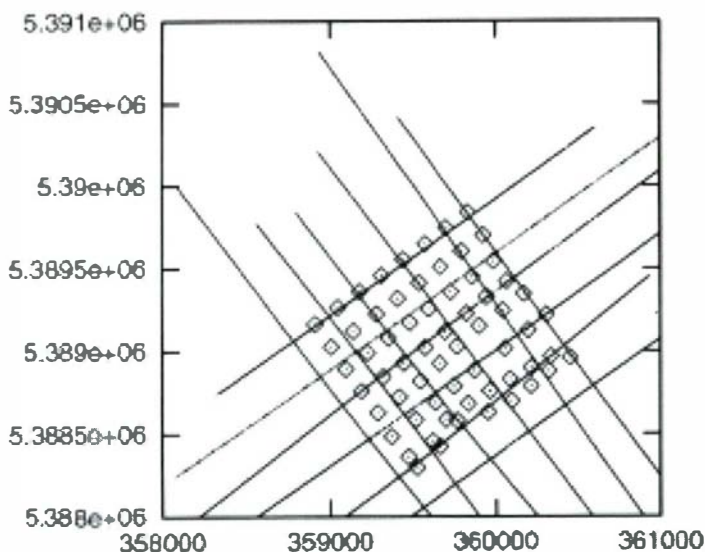
- d'une trace initiale d'étalonnage du bruit (émission laser coupée),
- d'une trace initiale contenant un top GPS généré par le PC,
- d'une séquence de dix traces / seconde contenant les échos laser en provenance du réseau,
- de deux traces finales de bruit et de top GPS.

**tableau B.5.1**

	13 mai 1998	14 mai 1998
Altitude	Nombre de bandes	Nombre de bandes
900 m	–	7
1200 m	28	27

Pendant l'acquisition des échos, des mesures météo étaient faites à une cadence de 1 Hz. En dehors de l'acquisition (pendant les manœuvres de positionnement de l'avion sur la bande suivante) des mesures météo étaient faites à une cadence de 10 Hz.

L'intérêt des tops GPS est de pouvoir synchroniser l'acquisition des mesures laser et le GPS en vue de l'identification des cibles renvoyant des échos, en fonction de la position de l'avion au-dessus du réseau.



**figure B.5.2** : trajectoires de l'avion au-dessus du réseau de réflecteurs

## Méthodes d'estimation

Le traitement des données concerne la résolution de deux problèmes inverses (estimation de paramètres) : celui des pseudo-distances (ou distances relatives) entre l'avion et les réflecteurs, à partir d'un signal numérisé contenant les échos laser, et celui des coordonnées des réflecteurs à partir de ces pseudo-distances et de coordonnées approchées à la fois de l'avion et de réflecteurs.

Autour de ces deux traitements majeurs, viennent se greffer une série de petits traitements de préparation des données (incluant le calcul de la trajectoire GPS de l'avion pour chaque tir et des positions approchées de réflecteurs, le changement de repères de ces coordonnées (projection UTM), la séparation des données (bruit, tops, signal, météo) en bandes...). De plus, les pseudo-distances sont corrigées du retard de propagation dû à la réfraction atmosphérique

(intérêt des mesures météo), et triées dans le but de rejeter tous les échos dont la superposition est trop importante ou qui pourraient être mal identifiés (par exemple : lorsqu'il y a peu d'échos par tir).

Finalement, la précision des coordonnées estimées des réflecteurs est analysée par comparaison avec la matrice de covariance *a posteriori*, et avec les hypothèses *a priori* fixées pour la résolution des problèmes. Ci-dessous, nous décrivons la modélisation retenue et le principe des deux méthodes d'estimation.

### Estimation des pseudo-distances

À chaque tir du laser, les instants d'arrivée des échos présents dans le signal (cf. figure B.5.3) sont estimés puis convertis en pseudo-distances (l'instant du tir n'étant pas connu à mieux de 1 ns) en multipliant les pseudo-temps de vol aller-retour par la vitesse de la lumière dans le vide.

Deux méthodes d'estimation des instants d'arrivées des impulsions laser avaient été considérées jusqu'ici : la corrélation du signal mesuré avec une impulsion de référence et la déconvolution du signal mesuré par rapport à une réponse impulsionnelle de référence [BOCK 96], [BOCK 98a], [BOCK 99a]. D'un point de vue théorique ces deux méthodes sont identiques tant que les échos sont bien séparés.

La première méthode s'apparente à un filtrage adapté et, est en fait plus économique en temps de calcul, mais ne fonctionne plus lorsqu'il y a superposition des échos. La déconvolution par moindres carrés permet d'estimer des paramètres liés aux échos (amplitude et position dans le signal) conjointement pour tous les échos de la trace.

Ainsi, si deux échos sont proches, le signal calculé pour l'ajustement par moindres carrés en tiendra compte. Nous allons détailler les évolutions de la méthode de déconvolution mise en œuvre pour le traitement des données de la campagne aérienne.

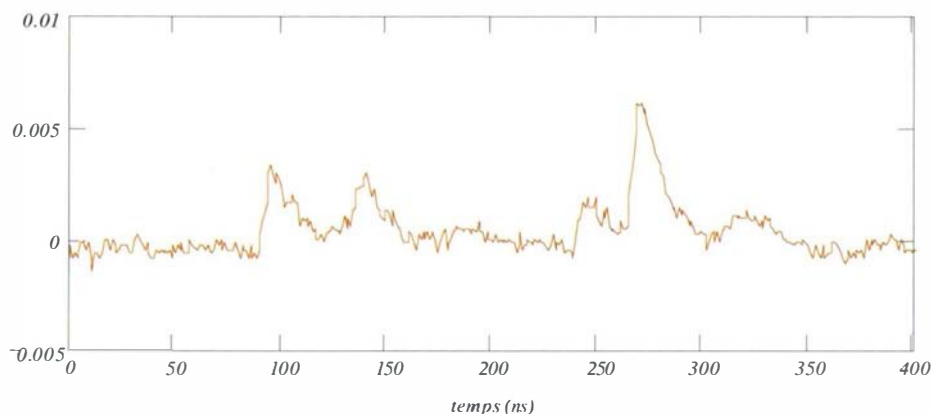


figure B.5.3 : signal mesuré (en volts), tir n° 130, bande n° 1, 13 mai 1998

### Principe de la méthode d'estimation

Soit  $x(t)$  le signal mesuré, composé de plusieurs échos et d'un bruit additif.

On modélise ce signal par  $f(\mathbf{p}, t)$ , où  $\mathbf{p}$  désigne le vecteur paramètre à estimer. Ce paramètre comporte pour chaque écho son amplitude  $a_i$  et sa position dans le signal  $\tau_i$ , ainsi que deux paramètres de pente dans le signal  $z_0$  et  $z_1$ , et un décalage global du signal par rapport aux positions *a priori*  $\tau_0$ . Ces derniers paramètres globaux ont été introduits dernièrement et n'existaient pas dans les modèles précédents [BOCK 96], [BOCK 98a], [BOCK 99a].

Le modèle direct s'écrit ainsi :

$$f(\mathbf{p}, t) = \sum_{i=1}^{N_{mes}} a_i y(t - r_i - \tau_i - \tau_0) + z_0 + z_1 \cdot t \quad (1)$$

où  $y(t)$  est la réponse impulsionnelle de référence (obtenue lors d'une phase d'étalonnage en laboratoire),  $r_i$  le retard dû à la réfraction (non ajusté) et  $N_{mes}$  le nombre d'échos théoriquement présents dans la trace mesurée.

Le temps est en pratique discret puisque le signal est échantillonné,  $t_n = t_0 + n \Delta t$  avec  $t_0$  l'instant de déclenchement de l'échantillonnage et  $N_{éch}$  le nombre d'échantillons par trace ( $n = 1..N_{éch}$ ).

La résolution du problème inverse se fait par la méthode des moindres carrés, en minimisant le critère suivant :

$$J(\mathbf{p}) = \sum_{n=1}^{N_{éch}} [x(t_n) - f(\mathbf{p}, t_n)]^2 \sigma_b^{-2} + \sum_{i=1}^{N_{param}} [p_i - p_i^0]^2 \sigma_{pi}^{-2} \quad (2)$$

avec  $\mathbf{p}^0$  le paramètre *a priori*, dont les composantes sont connues avec une précision  $\sigma_{p_i}$ ,  $\sigma_b$  la précision de mesure du signal (bruit) et  $N_{param}$  la dimension du paramètre. L'ajout des contraintes *a priori* sur les paramètres permet d'éviter la singularité de la matrice à inverser lorsque les échos sont trop proches (leurs paramètres deviennent alors fortement corrélés).

Comme le modèle  $f(\mathbf{p},t)$  n'est pas linéaire par rapport aux positions il faut d'abord le linéariser et résoudre ensuite le problème linéaire (moindres carrés simples). Pour cela, une valeur approchée de  $\mathbf{p}$  est utilisée, mais si cette valeur initiale est loin de la solution exacte il faut mettre en œuvre une méthode itérative.

Ceci est en fait le cas ici car les positions approchées de l'avion et des réflecteurs au sol ne sont pas connus précisément. Dans ce cas, le mauvais conditionnement de la matrice freine la convergence du procédé.

La méthode itérative employée est du type "quasi-Newton". Par rapport à la méthode précédente [BOCK 96], [BOCK 98a], [BOCK 99a], nous testons également la convergence,  $J(\mathbf{p}^{k+1}) < J(\mathbf{p}^k)$  où  $k$  est le numéro d'itération. Lorsque cette condition n'est pas vérifiée, on applique un coefficient de relaxation  $\mu_k$ . Dans ce cas, le coefficient  $\mu_k$  est calculé par interpolation parabolique à partir de trois points, i.e. on suppose le critère  $J(\mathbf{p})$  localement quadratique.

La solution calculée est donc la suivante :

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k + \mu_k \left( \mathbf{G}_k^T \mathbf{C}_{vv}^{-1} \mathbf{G}_k + \mathbf{C}_{pp}^{-1} \right)^{-1} \left( \mathbf{G}_k^T \mathbf{C}_{vv}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{f}(\mathbf{p}^k)) + \mathbf{C}_{pp}^{-1} (\mathbf{p}^0 - \mathbf{p}^k) \right) \quad (3)$$

où  $\mathbf{C}_{pp}$  et  $\mathbf{C}_{bb} = \sigma_b^2 \mathbf{I}$  sont les matrices de covariance *a priori* associées au paramètres initial  $\mathbf{p}^0$  et au signal mesuré,  $\mathbf{G}_k$  est la matrice des dérivées partielles évaluée pour  $\mathbf{p}^k$ ,  $\mathbf{x}$  est le vecteur signal mesuré et  $\mathbf{f}(\mathbf{p}^k)$  le vecteur signal modélisé. En pratique, la solution est calculée avec une méthode de Cholesky.

On calcule également pour chaque solution sa matrice de covariance *a posteriori* :  $(\mathbf{F}_k^T \mathbf{C}_{bb}^{-1} \mathbf{F}_k + \mathbf{C}_{pp}^{-1})^{-1}$ ,

ce qui permet d'associer aux instants d'arrivées, donc aux distances mesurées, une précision théorique, mais aussi de détecter de degré de corrélation entre les paramètres des échos voisins. Pour obtenir cette dernière information il faut alors fixer le décalage global de la trace,  $\tau_0$ , car celui-ci est responsable d'une corrélation entre tous les échos.

Théoriquement,  $J(\mathbf{p})$  suit une loi du  $\chi^2$  à  $N_{éch}$  degrés de liberté, de moyenne  $N_{éch}$  et d'écart-type  $\sqrt{2N_{éch}}$ ,

qui tend vers une loi normale car  $N_{éch} \sim 1000$ . L'évaluation de  $J(\mathbf{p})$  permet d'effectuer un tri *a posteriori* selon la valeur finale de  $J(\mathbf{p})$  : on rejette les traces dont  $J(\mathbf{p})$  s'écarte de plus de quelques écarts-type.

## Performances sur des données simulées

Plusieurs jeux de simulations ont été utilisés pour mettre au point la méthode, notamment pour le choix des poids des paramètres approchés et des critères de décision sur la convergence. En effet, toutes les traces ne contiennent pas d'échos et il ne sert à rien d'itérer plusieurs fois le calcul dans ce cas.

Parfois la solution oscille entre deux valeurs et il faut alors également arrêter le processus. D'autres fois le critère  $J(\mathbf{p})$  varie beaucoup sous l'effet d'un paramètre non contraint alors que pour les échos bien contraints la solution est stabilisée. Autant de cas apparaissent lorsque l'on tente de déconvoluer des échos très proches.

Le tableau B.5.2, ci-dessous, donne des résultats statistiques à partir de données simulées, pour dix tirs issus de la partie centrale de la bande n° 1 (cf. figures B.5.2 et B.5.3) et en supposant une amplitude des échos d'environ 5 mV pour un bruit de 0,3 mV. Ces données sont triées avec des seuils sur la corrélation *a posteriori* entre les positions des échos de 40% et sur la précision théorique de dix centimètres.

tableau B.5.2 : résultats de simulations

Tir	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\overline{DR}$ (m)	-0,3009	-1,4952	-0,0027	-1,802	0,4736	-1,336	0,1423	1,0479	-0,3011	-0,7362
$\sigma_{DR}$ (m)	0,0182	0,0211	0,0127	0,0211	0,0042	0,0546	0,0218	0,0074	0,0169	0,0187
$N_{mes/tir}$	7	8	8	12	3	11	11	7	13	10
$\chi^2 / N_{éch}$	1,138	1,1228	1,2216	1,1993	1,431	1,3348	1,3772	1,1498	1,3019	1,1666

$\overline{DR}$  = erreur moyenne en distance.

$\sigma_{DR}$  = écart-type de l'erreur en distance.

$N_{mes/tir}$  = nombre d'échos estimés/tir.

$\chi^2 / N_{éch}$  = mesure de la convergence.

L'écart-type moyen pour ces simulations est  $\overline{\sigma_{DR}} = 1,97$  cm, ce qui est en bon accord avec la précision théorique valant 2,11 cm. Toutefois, certains tirs comme le n° 5 semblent encore comporter des données aberrantes qu'il est possible de détecter par un test supplémentaire.

On rejette tous les échos dont la distance relative avec un autre écho est inférieure à un seuil  $S_{DR}$ . De plus, on ne retient que les échos dont le rapport signal/bruit est supérieur à 3 et les tirs ayant finalement au moins trois distances estimées. Le tableau B.5.3 suivant donne les résultats moyens pour plusieurs valeurs de  $S_{DR}$ .

**tableau B.5.3 : résultats moyens en fonction du seuil de tri des données**

$S_{DR}$	1 m	1,5 m	2 m
$\overline{\sigma_{DR}}$	1,92 cm	1,85	1,67
$\overline{N}_{mes/tir}$	8,9	8,2	5,7

Dans les trois cas, on obtient  $\sigma_{DR} = 4,95$  cm pour le tir n° 5. Ce tir pourrait finalement être rejeté sur la base d'un tri sur  $\chi^2 / N_{ech} < 1,33$ , par exemple. Il est à noter que le nombre de mesures/tir est très faible pour  $S_{DR} = 2$  m, car il y a beaucoup de superpositions (cf. figure B.5.3).

## Estimation des coordonnées des réflecteurs

Le principe d'estimation des coordonnées des réflecteurs est la multilatération à partir de pseudo-distances. Par rapport aux expériences terrestre antérieures, [BOCK 96], [BOCK 98a], [BOCK 98b], l'expérience aérienne permet d'estimer les trois coordonnées des réflecteurs (bien qu'en théorie la coordonnée radiale soit toujours mieux déterminée que les coordonnées transverses).

Une différence de taille pourtant entre les deux configurations est qu'il faut ici beaucoup plus de données pour inverser le problème. Au minimum douze passages au-dessus du réseau sont nécessaires pour mesurer tous les réflecteurs et recalculer la trajectoire de l'avion par rapport au réseau. Cette dernière étant mesurée par D-GPS, elle comporte des erreurs systématiques de l'ordre de cinquante centimètres sur des durées d'environ cinq à dix minutes [BOCK 96], [BOCK 98a].

Pour chaque passage un couple de décalages et dérivées de l'avion ont donc été modélisés. Nous avons également ajouté un paramètre de décalage systématique sur les pseudo-distances en plus des décalages ajustés à chaque tir. Principalement ces deux modifications ont été apportées à l'algorithme d'estimation des coordonnées des réflecteurs dont nous rappelons ci-dessous le principe.

## Principe de la méthode d'estimation

Les pseudo-distances sont obtenues à l'étape précédente d'estimation :  $\rho_{ij} = (c/2)\tau_{ij}$ , avec  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide, et où  $j$  indique le numéro de tir. Elles sont corrigées de l'effet de la réfraction atmosphérique (éliminé par  $r_i$ ).

Le modèle direct peut donc s'écrire :

$$g_{ijk}(q) = \left[ \left( \mathbf{U}_i - \mathbf{V}_{jk} - \mathbf{W}_{jk} \right)^T \left( \mathbf{U}_i - \mathbf{V}_{jk} - \mathbf{W}_{jk} \right) \right]^{1/2} + b_{jk} \quad (4a)$$

$$\mathbf{W}_{jk} = \mathbf{W}_{o,k} + \mathbf{W}_{d,k} \times t_{jk} \quad (4b)$$

$$b_{jk} = b_o + \delta b_{jk} \quad (4c)$$

avec  $\mathbf{U}_i$  la position du  $i$ -ième réflecteur,  $\mathbf{V}_{jk}$  la position de l'avion au  $j$ -ième tir laser de la  $k$ -ième bande,  $\mathbf{W}_{jk}$  le modèle de dérive de la position de l'avion (comportant un décalage  $\mathbf{W}_{o,k}$  et une dérive  $\mathbf{W}_{d,k}$  par bande, le temps  $t_{jk}$  étant réinitialisé à chaque bande), et  $b_{jk}$  le biais en pseudo-distance (comportant une composante globale  $b_o$ , pouvant compenser un résidu de décalage instrumental, et une composante aléatoire de tir à tir,  $\delta b_{jk}$ ).

Le critère minimisé s'écrit:

$$J(q) = \left( \rho - g(q^0) \right)^T C_{\rho\rho}^{-1} \left( \rho - g(q^0) \right) + \left( q - q^0 \right)^T C_{qq}^{-1} \left( q - q^0 \right) \quad (5)$$

avec  $q^0$  le paramètre *a priori*, dont la matrice de covariance *a priori* associée est  $C_{qq}$ ,  $\rho$  le vecteur des observations et  $C_{\rho\rho}$  sa matrice de covariance (diagonale).

L'estimation du paramètre  $q$  se fait par une méthode de moindres carrés linéarisés avec une résolution partielle des inconnues de tir,  $V_{jk}$  et  $\delta b_{jk}$ . L'équation normale finale n'inclut donc que les inconnues de position des réflecteurs,  $U_i$ , et les paramètres globaux :  $W_{\alpha,k}$ ,  $W_{d,k}$  et  $b_0$ . Elle est résolue par une méthode de Cholesky [BOCK 96, 98a]. On calcule également la matrice de covariance *a posteriori* qui permet d'analyser la précision théorique de la solution.

## Résultats

### Paramétrisation

Une fois les algorithmes définis, il faut bien choisir les paramètres de calcul (incertitudes sur les observations et sur les paramètres *a priori*, seuils pour le tri de données, réflecteurs à fixer pour la multilatération). Du choix de ces paramètres va dépendre la précision théorique et l'exactitude de la solution calculée. Une paramétrisation correcte repose donc sur une bonne connaissance des sources d'erreurs de mesure et de modélisation du problème.

Pour ce qui concerne l'estimation des pseudo-distances, l'incertitude sur le signal mesuré est prise égale au bruit rms,  $\sigma_b$ . Cette hypothèse peut être mise en défaut lorsqu'il y a des parasites superposés à la trace mesurée. Pour les incertitudes sur le paramètre *a priori*  $p^0$ , le choix a été ajusté à l'aide de simulations.

Pour ce qui concerne le problème de multilatération, la précision sur les pseudo-distances est issue du calcul de la variance *a posteriori* sur  $p$ .

Pour les incertitudes sur le paramètre *a priori*  $q^0$ , le choix est également ajusté à l'aide de simulations. Un choix critique est notamment celui de l'incertitude sur la position approchée du point d'émission laser dans l'avion. En effet, lors des mesures, environ dix mètres séparaient l'antenne GPS (au niveau du cockpit) de l'émission laser (trappe arrière). Des simulations ont montré que lors des phases d'accélération / décélération et virages de l'avion, la trajectoire du point d'émission pouvait s'écarter de celle de l'antenne d'environ un mètre (en X, Y et Z). Ceci nous oblige à prendre des incertitudes *a priori* assez élevées pour  $V_{jk}$  et  $W_{\alpha,k}$ .

Un autre paramètre critique est celui de l'incertitude *a priori* sur les positions des réflecteurs. Ces dernières ont été relevées par GPS cinématique et devraient être de l'ordre de 2-3 cm en X,Y et d'environ 5 cm en Z (problème lié à la réfraction atmosphérique). Comme la partie utile des bandes est faible,  $W_{d,k}$  peut être fixé. Quant à  $b_0$ , afin d'éviter une interaction trop forte avec  $W_{\alpha,2}$ , il faut laisser ce paramètre peu contraint.

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les incertitudes *a priori* suivantes :

$$\sigma_{U_{\alpha}}^{(prior)} = 5 \text{ m}, \sigma_{V_{\alpha}}^{(prior)} = 2 \text{ m}, \sigma_{W_{\alpha}}^{(prior)} = 3 \text{ m}, \sigma_{W_{d\alpha}}^{(prior)} = 10^{-4} \text{ m}, \text{ (avec } \alpha \in \{x,y,z\})$$

$$\sigma_{b_0}^{(prior)} = 10 \text{ m}, \sigma_{\delta b}^{(prior)} = 2 \text{ m}, \text{ et en fixant les quatre réflecteurs des coins du réseau.}$$

### Analyse des résultats

Pour chaque journée, les données ont été scindées en deux séries. Ceci permet d'abord de comparer les solutions d'une même journée et, ensuite, les solutions entre jours différents. Ainsi nous ajustons les seuils de tri sur les données expérimentales jusqu'à ce que les résultats obtenus soient compatibles avec les précisions théoriques (variance *a posteriori*).

Les meilleurs résultats (selon ce critère) ont été obtenus pour :

$$S_{DR} = 1 \text{ m et } \chi^2 / N_{éch} < 1,22 \text{ (soit la tolérance de cinq écarts-type, avec } N_{éch} \sim 1000).$$

Le tableau B.5.3, page suivante, indique les résultats obtenus avec cette paramétrisation.

On peut noter que  $\overline{\sigma_x} \sim \sigma_{U_x}^{(prior)}$ , c'est-à-dire que les composantes planimétriques ne sont pas contraintes par les mesures. Par contre, la composante altimétrique, elle, est bien contrainte puisque  $\overline{\sigma_z} < \sigma_{U_z}^{(prior)}$ . Les autres paramètres sont également bien contraints.

Les résultats de comparaison des solutions sont présentés dans le tableau B.5.4. Il apparaît que les EQM en X et Y sont beaucoup plus faibles que les précisions théoriques. Ceci provient du fait que ces composantes ne sont pas bien contraintes par les mesures. La solution calculée s'écarte donc assez peu de la solution initiale.

Par contre, l'EQM en Z est proche de la précision théorique attendue, ce qui démontre que les mesures contraignent cette composante. Toutefois, ces contraintes restent faibles car il y a peu de mesures. La précision obtenue n'est ainsi que de 4,4 cm.

Elle pourrait être améliorée en prenant par exemple des données triées avec  $S_{DR} = 2$  m, mais  $N_{mes}$  passerait ainsi à 484 et 1 350, respectivement pour les séries 13 et 14. On obtient alors  $\hat{\sigma}_{\Delta Z} = 4$  cm et  $\overline{\sigma}_{\Delta Z} = 4,7$  cm, mais dans ce cas les (trop peu nombreuses) mesures n'apportent plus beaucoup de contraintes ( $\overline{\sigma}_z < \sigma_{U_z}^{(prior)}$ ).

**tableau B.5.3 : résultats statistiques**

Série	$N_{mes}$	$\overline{N}_{mes/cc}$	$\overline{N}_{mes/tir}$	$\overline{\sigma}_x$ (cm)	$\overline{\sigma}_z$ (cm)	$\overline{\sigma}_{W_{ox}}$ (m)	$\overline{\sigma}_{W_{oz}}$ (m)	$\overline{Jb_o}$ (m)
13-A	498	7,8	5,2	5	3,2	0,8	1	0,5
13-B	582	8,1	5,2	5	3,1	0,75	1	0,4
14-A	1570	24,5	5,1	4,9	2,6	0,5	1	0,3
14-B	860	23,3	5,1	4,9	3,1	0,75	1	0,4

i) estimation des pseudo-distances :

$N_{mes}$  = nombre total des mesures,  $\overline{N}_{mes/cc}$  = nombre moyen par réflecteur,  $\overline{N}_{mes/tir}$  = nombre moyen par tir ;

ii) estimation des coordonnées :

$\overline{\sigma}_x, \overline{\sigma}_z$  = réflecteurs,  $\overline{\sigma}_{W_{ox}}, \overline{\sigma}_{W_{oz}}$  = décalage avion,  $\overline{\sigma}_{b_o}$  = décalage global en distance ;

$$(\overline{\sigma}_y \sim \overline{\sigma}_x, \overline{\sigma}_{W_{oy}} \sim \overline{\sigma}_{W_{ox}}).$$

**tableau B.5.4 : comparaison des solutions**

Série	$N_{mes}$	$\overline{\sigma}_{\Delta X}$ (cm)	$\overline{\sigma}_{\Delta Z}$ (cm)	$\hat{\sigma}_{\Delta X}$ (cm)	$\hat{\sigma}_{\Delta Y}$ (cm)	$\hat{\sigma}_{\Delta Z}$ (cm)
13-A – 13-B	498 – 582	7	4,5	1,1	1,2	4,7
14-B – 14-B	1 570 – 860	7	3,7	2,0	1,7	3,4
13 – 14	835 – 2 398	6,8	3,9	2,6	2,1	4,4

$\overline{\sigma}_{\Delta X}, \overline{\sigma}_{\Delta Z}$  = précisions théoriques ;  $\hat{\sigma}_{\Delta X}, \hat{\sigma}_{\Delta Y}, \hat{\sigma}_{\Delta Z}$  = EQM entre les solutions.

## Conclusion

Les résultats présentés ici sont satisfaisants du point de vue de la cohérence entre EQM observé et précision théorique attendue. Ce résultat n'a pu être obtenu qu'après modification des modèles et des algorithmes existants et une laborieuse paramétrisation de ceux-ci.

De plus, un tri sévère des pseudo-distances estimées s'avérait nécessaire du fait de la forte superposition des échos dans le signal mesuré. En conséquence de ce tri, il reste peu de données à la fin et la précision sur la coordonnée verticale des réflecteurs relativement faible.

Cette expérimentation ne nous permet donc pas de démontrer qu'un positionnement millimétrique est possible en configuration aérienne. Nous pouvons toutefois supposer que dans des conditions expérimentales plus favorables (réflecteurs au sol plus espacés) une telle précision pourrait être atteinte. Ceci est notamment soutenu par les résultats expérimentaux au sol [BOCK 96], [BOCK 98a], [BOCK 99a] et les simulations aériennes [BOCK 99b].

De plus, si l'attitude de l'avion avait été mesurée lors des vols, l'incertitude sur la position approchée du point d'émission pourrait être réduite à :

$\sigma_{V_e}^{(prior)} = 5$  cm, par exemple, avec comme conséquence  $\overline{\sigma}_{\Delta Z} = 2,9$  cm, au lieu de 3,9 cm, soit une légère amélioration précision théorique.

Mais on peut supposer qu'une telle réduction de  $\sigma_{V_e}^{(prior)}$  améliorerait également la déconvolution, avec dans ce cas une augmentation de  $N_{mes}$  et finalement une diminution de  $\overline{\sigma}_{\Delta Z}$  bien plus importante.



Dans l'état actuel, la technique souffre encore de limitations d'ordre instrumental puisque pour l'instant le système ne permet pas de réaliser des mesures au-delà d'une altitude d'environ 3 000 mètres. Afin d'atteindre des altitudes plus élevées, il faudrait sans doute employer un détecteur avec gain interne (par exemple : une photodiode à avalanche de seize millimètres de diamètre, Advanced Photonix).

D'un point de vue de la modélisation et des méthodes numériques, une amélioration possible consisterait en une fusion des deux problèmes, c'est-à-dire, une estimation directe des positions des réflecteurs à partir des observations du signal laser.

Ceci améliorerait sans doute la convergence du procédé, notamment lorsque  $\sigma_{v_\alpha}^{(prior)}$  est assez élevé.

Toutefois, par rapport à la méthode actuelle, le tri des données serait moins souple. Une autre voie à explorer serait l'extension de l'estimation aux inconnues de tir actuellement éliminées (positions de l'avion et décalage temporel du signal à chaque tir). Pour cela, il faudrait peut-être mettre en œuvre une méthode de gradients conjugués car le nombre d'inconnues serait beaucoup plus important.

La campagne aérienne sur Crucey aura donc permis :

- de démontrer la possibilité de mettre en œuvre le système dans un avion (en particulier le laser à modes bloqués),
- de montrer qu'il est souhaitable de mesurer l'attitude de l'avion,
- d'améliorer le processus de déconvolution, les méthodes de tri et le processus de multilatération.

Comme suite à ce travail il faudrait maintenant envisager une seconde campagne de validation, sur un terrain d'au moins 4 km x 4 km. Étant donné que nous pouvons être confiants sur les performances du système, cette future campagne pourrait se faire à frais partagés dans le cadre de mesures géophysiques comme la sismologie ou la surveillance d'affaissements miniers. Des contacts ont déjà été pris avec l'IPGP et le BRGM pour ces deux types d'applications.

## Remerciements

Nous tenons à remercier MM. Stervinou et Tardieu, ainsi que toute l'équipe du Service des Activités Aériennes de l'IGN à Creil, pour leur dévouement, leur soutien et leur participation à cette expérimentation.

Nous remercions également pour leurs interventions M. Penazzi, coordinateur des campagnes ARAT et M. Gribkoff, responsable de l'instrumentation de l'ARAT, tous deux de l'INSU, ainsi que M. Zurfluh, de l'INRA.

Notons également que cette campagne a pu être réalisée grâce à la participation financière du PNTS.

## Références

- [COHEN 87] S.C. Cohen, J.J. Degnan, J.L. Bufton, J.B. Garvin, & J.B. Abshire : *The geoscience laser altimetry/ranging system*, in IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing **GE-25**, pp. 581–592, 1987.
- [KAHN 80] W.D. Kahn, F.O. Vonbun, D.E. Smith, T.S. Englar, & B.P. Gibbs : *Performance analysis of the spaceborne laser ranging system*, in Bull. Geod. **54**, pp. 165–180, 1980.
- [KAHN 82] W.D. Kahn, J.J. Degnan & T.S. Englar : *The Airborne Laser Ranging System, Its Capabilities and Applications*, in NASA Technical memorandum n° 8394, 27 pages, September 1982.

## Publications

- [BOCK 95] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & D. Fourmaintraux : *Development of a new airborne laser subsidence measurement system, aiming at mm-accuracy*, in Proceedings of the 5th International Symposium on Land Subsidence, F.B.J. Barends, F.J.J. Brouwer, F.H. Schröder, ed. (Balkema, Rotterdam, 1995), pp. 113-122, laboratoire OEMI, IGN-SR 950001/L-COM, 1995.
- [BOCK 96] O. Bock : *Étude et réalisation d'un télémètre laser aéroporté en champ large sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol. Étude de l'adaptation du système à un véhicule satellitaire*, thèse de doctorat, Université Denis Diderot - Paris 7, laboratoire OEMI, IGN-SR 960017/L-COM,
- [BOCK 98a] O. Bock, M. Kasser, C. Thom & J. Pelon : *Study of a wide angle laser ranging system for relative positioning of ground-based benchmarks with millimeter accuracy*, in J. Geod., vol. **72**, n° 7/8, pp. 442–459, July/August 1998, laboratoire OEMI, IGN-SR 980007/L-ART, 1998.
- [BOCK 98b] O. Bock, M. Kasser & C. Thom : *First aircraft experiment with the WA-ALRS*, in Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 21-25 Sept. 1998, Deggendorf (D), laboratoire OEMI, IGN-SR 980008/L-COM, 1998.

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

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

## B.6 Gestion tridimensionnelle de données géographiques

Arnaud de la Losa

### Résumé

Les données géographiques ont jusqu'à présent été essentiellement représentées en deux dimensions, en raison des limites imposées par le support papier. Dorénavant, grâce au support numérique, une gestion tridimensionnelle est envisageable.

L'objectif fixé est d'imaginer un modèle capable de représenter tout type de formes géométriques, ponctuelles, linéaires, surfaciques ou volumiques, et d'y adjoindre un modèle topologique tridimensionnel dans le même ordre d'idée que les modèles topologiques couramment utilisés dans les SIG 2-D.

La visualisation de données tridimensionnelles est une application fort intéressante et incontournable, mais ne doit pas cacher l'essentiel : la modélisation. Cependant, une fois la modélisation achevée, certaines applications qui pourront faciliter l'exploitation doivent être envisagées : construction automatique des informations topologiques, transformation de bases 3-D vers bases 2-D.

### Contexte - objectifs

La BD Topo de l'IGN est parfois qualifiée de base de données géographiques en trois dimensions. Certes, les points de cette base sont bien tridimensionnels car plongés dans un espace à trois dimensions, mais sont en fait gérés grâce à un modèle 2-D1/2 (données planes avec un attribut altitude ajouté sur chaque point).

Un tel modèle permet d'intégrer le relief, mais présente encore de fâcheuses contraintes : un seul point pour chaque couple  $(x, y)$  ; il en découle l'impossibilité de gérer des faces verticales, pas de superpositions d'objets, pas de volumes. Certains objets géographiques ne peuvent alors pas être correctement représentés : bâtiments avec faces verticales, lacs volumiques, terrain avec falaises ou surplombs, ponts, etc.

On souhaite alors définir un modèle qui sache convenablement représenter tout type d'objets géographiques. De plus, le modèle choisi devra également être pourvu d'une structure topologique afin de garantir une bonne cohérence des données et de faciliter certaines requêtes d'ordre topologique dont la résolution est laborieuse grâce aux seules données géométriques.

L'introduction d'objets réellement tridimensionnels entraînera la création de nouvelles applications : gestion volumique du réseau hydrographique (lacs, nappes souterraines, etc.), possible intégration de données de plusieurs sources (volumes rocheux du sous-sol, réseaux d'eau, de gaz, d'électricité, et de télécommunication, classification de l'espace aérien en fonction de l'accessibilité, etc.) pour étudier l'influence de certaines classes d'objets sur la réalisation ou la modification d'un autre objet géographique (pour le percement d'un tunnel, par exemple).

L'affichage d'objets tridimensionnels constitue sans aucun doute l'application la plus attrayante en raison de son caractère spectaculaire, mais ne doit pas monopoliser toute la recherche. Nous nous attacherons plutôt à définir un modèle de données afin de rendre envisageable en trois dimensions la plupart des applications réalisées en deux dimensions, et dans la mesure du possible, accroître leur efficacité.

Notre objectif premier n'est pas le développement des applications précédemment citées, mais la définition d'un modèle permettant la réalisation ce type d'application. Nous allons donc présenter nos choix de modélisation, puis sa validation sur quelques exemples simples.

### Choix du modèle

Nous sommes partis d'un modèle, utilisé dans certains Systèmes d'Information Géographique bidimensionnels, muni d'une structure topologique capable de gérer toute sorte de configuration en deux dimensions (faces trouées, entre autres). Nous allons d'abord présenter l'extension du modèle topologique, et poursuivre par le niveau géométrique pour enfin présenter certains objets géographiques qui peuvent se révéler problématiques.

### Modèle topologique

Le modèle de carte topologique a été étendu afin de supporter les volumes, le partage des arcs par plus de deux faces, ainsi que les différents types de trous [DE LA LOSA 98].

Rappel du modèle de carte topologique 2-D (voir figure B.6.1) :

Une carte topologique gère les ensembles de sommets (ou nœuds)  $S$ , les arêtes  $A$ , les faces  $F$  ainsi que les brins (arcs orientés)  $B$ .

On pose :  $F = F \cup \infty$ .

Sur ces ensembles sont définies un certain nombre de fonctions :

$\alpha : B \rightarrow B$  renvoie le brin inverse,

$\sigma : B \rightarrow B$  renvoie le brin suivant en tournant autour du nœud final dans un sens fixé (voir figure B.6.3),

$\varphi : B \rightarrow B$  renvoie le brin suivant avec même nœud final,

$\Sigma : B \rightarrow S$  renvoie le nœud final d'un brin,

$A : B \rightarrow A$  renvoie l'arête sur laquelle repose le brin,

$\Phi : B \rightarrow F$  renvoie sa face (la face à droite du brin),

$T : F \rightarrow \bar{F}$  renvoie la face trouée.

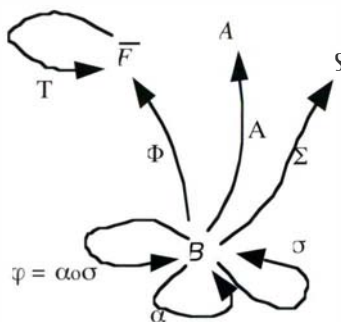


figure B.6.1 : ensembles et fonctions définissant la carte topologique [DAVID 91]

### Extension 3-D de la carte topologique

Les objets présents dans l'extension du modèle de carte topologique sont : nœud (ou sommet), arc non orienté (ou arête), arc orienté (ou brin), face non orientée, face orientée et volume.

Les objets-arcs et faces sont décomposés en arcs et faces orientés pour la gestion topologique et pour faciliter la représentation de certains objets géographiques (réseaux orientés, rangées d'arbres d'un seul côté d'une route, etc.).

Il nous faut maintenant relier ces différents objets au moyen de relations topologiques.

### Extension de la relation $\alpha$ du modèle de carte topologique

La relation  $\alpha$  en deux dimensions renvoie, pour un arc orienté, son arc orienté inverse. L'extension 3-D de l'arc orienté étant la face orientée, l'extension de la relation  $\alpha$  s'applique alors sur la face orientée, et renvoie la face orientée inverse ( $\alpha_1$  sur la figure B.6.2, page suivante).

Un arc orienté du modèle 2-D peut aussi être considéré comme un couple (arête, nœud final). Depuis ce point de vue, la relation  $\alpha$  renvoie le couple (arête, nœud final suivant sur la même arête) ; on remarque que c'est également le couple (arête, nœud final précédent sur la même arête) puisqu'une arête dispose exactement de deux extrémités.

En trois dimensions, la face orientée peut également être vue comme un couple (face non orientée, arc orienté) et l'extension de  $\alpha$  renvoie alors le couple (face non orientée, arc orienté suivant) ( $\alpha_2$  de la figure B.6.2).

Une troisième interprétation est possible : le couple (arête, nœud final) obtenu après  $\alpha$  est le couple qui permet d'arriver sur l'arc orienté inverse. La relation  $\alpha_3$  de la figure B.6.2 renvoie alors le couple (face non orientée, arc orienté inverse) qui permet de retomber sur la face orientée inverse.

Remarque : l'équivalence entre les couples (arête, nœud final) et arcs orientés ne peut pas être étendue à la troisième dimension puisqu'une face orientée fait référence à plusieurs couples (face non orientée, arc orienté).

C'est pour cette raison que l'unique relation  $\alpha$  s'étend en plusieurs relations distinctes. À partir des trois points de vue différents, la relation  $\alpha$  en 2-D renvoie toujours le même résultat.

En revanche, à partir des trois points de vue en 3-D, on aboutit à trois résultats différents et tous très importants pour parcourir les objets grâce aux liens topologiques :  $\alpha_1$  pour obtenir les deux volumes partagés par une face,  $\alpha_2$  pour récupérer le contour d'une face,  $\alpha_3$  pour obtenir l'arc orienté inverse.

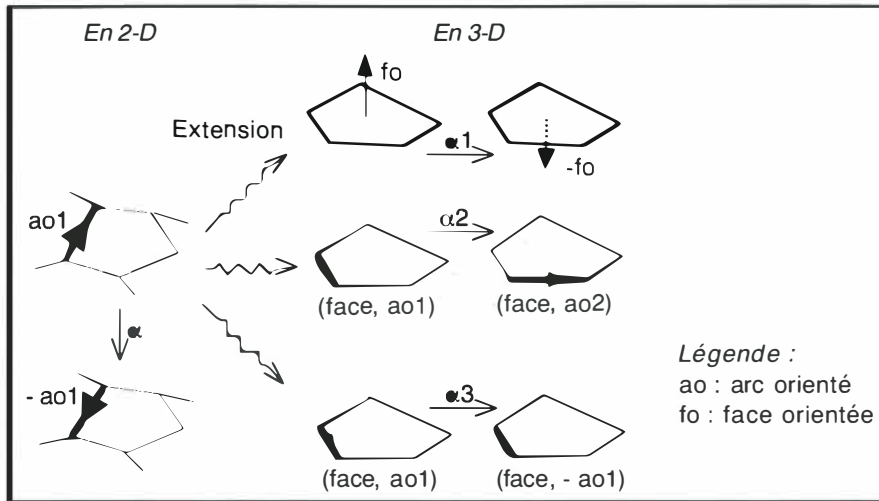


figure B.6.2 : extension de la relation  $\alpha$

### Extension de la relation $\sigma$ de la carte topologique 2-D

Soit  $ao1$  un arc orienté, la relation  $\sigma$  renvoie l'arc orienté suivant inverse,  $-ao2$  sur la figure B.6.3, ci-dessous. Combinée à la relation  $\alpha$ , on obtient l'arc orienté suivant. Et grâce à une itération sur  $\alpha \circ \sigma$ , on retrouve facilement le contour des faces. Ici, l'extension ne s'applique que sur les couples (face non orientée, arc orienté) puisque l'on a nécessairement besoin d'une "extrémité" autour de laquelle on tourne pour obtenir le couple suivant.

Comme pour le contour des faces en deux dimensions, une itération sur la combinaison de  $\sigma$  et de  $\alpha 3$  permet de récupérer toutes les faces qui composent une frontière d'un volume.

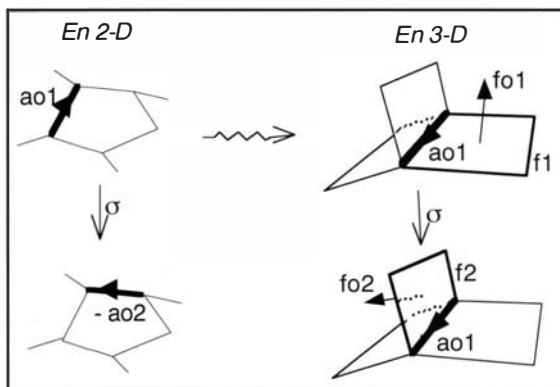


figure B.6.3 : extension de la relation  $\sigma$

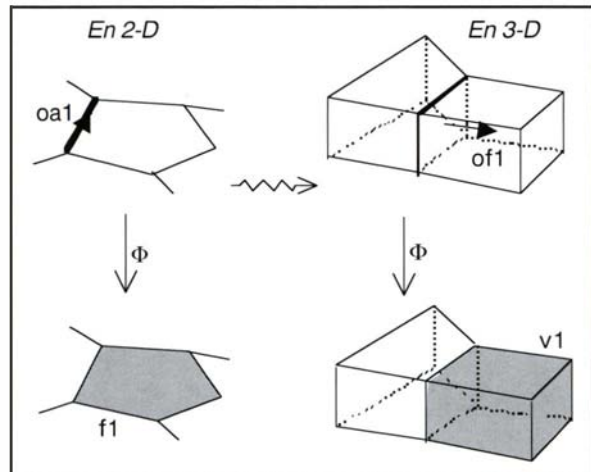


figure B.6.4 : extension de la relation  $\phi$

### Extension de la relation $\phi$

Cette relation, qui renvoie la face située à droite d'un arc orienté, est naturellement étendue à la relation qui, appliquée à une face orientée, renvoie le volume situé "à droite" de la face orientée (voir figure B.6.4, ci-dessus).

### Extension des trous surfaciques

Ces trous surfaciques s'étendent exactement dans le modèle tridimensionnel en cavités volumiques. En deux dimensions, un trou surfacique est défini par un contour linéaire à l'intérieur d'une face. Cela se traduit en trois dimensions par un contour surfacique à l'intérieur d'un volume. Un volume est alors défini par une frontière extérieure, et par  $n$  frontières intérieures. Si les trous surfaciques sont les seuls trous en deux dimensions, il n'en est pas de même en trois dimensions. Les faces plongées dans un espace 3-D peuvent être composées de plusieurs anses, et provoquent alors des trous débouchants s'ils composent la frontière d'un volume (un tore est une sphère à une anse).

Les trous à l'intérieur de faces 3-D présentent, quant à eux, de fortes différences avec les trous surfaciques 2-D, et ne peuvent pas être vu comme une extension 2-D vers 3-D. Un trou surfacique 3-D peut trouer plusieurs faces, mais la principale différence avec les trous 2-D est qu'il n'existe aucune distinction topologique entre les  $n$  contours d'une

face 3-D. Donc, d'un point de vue purement topologique, il n'existe pas de trou dans les faces 3-D, mais uniquement un nombre de contours qui peut aller de 1 à n.

Si en deux dimensions, une ligne fermée est toujours topologiquement équivalente à un cercle, il n'en est pas de même pour les lignes fermées en trois dimensions. Une ligne fermée en trois dimensions est toujours équivalente à un nœud (nœud trivial lorsque la ligne est homéomorphe à un cercle), et il existe une infinité de nœuds. On peut alors classer les contours linéaires en fonction de leur appartenance à telle ou telle classe de nœuds.

En 2-D, deux lignes fermées sont toujours disjointes. La différence qui apparaît avec la troisième dimension est que n lignes fermées peuvent être imbriquées et composent alors des chaînes plus ou moins complexes.

Ces deux dernières caractéristiques mathématiques des courbes ou groupes de courbes fermées ne sont pas conservées car leur utilité est limitée en information géographique.

## Relation suivant la verticale

Contrairement aux "petits" objets manipulés en CAO dont les trois dimensions sont souvent équivalentes, le monde géographique n'est pas également étendu suivant ses trois axes. C'est suivant la troisième dimension, la verticale, qu'il existe une contrainte forte qui oblige les objets à rester au sol, ce qui limite considérablement l'épaisseur, comparée aux deux autres dimensions horizontales qui sont libres.

De plus, l'information "est au-dessus de" peut être très intéressante si l'on souhaite retrouver les différents réseaux souterrains situés sous une route lors de sa réfection, par exemple. Combinée à l'adjacence, la relation "est au-dessous de" permet d'obtenir les objets "posés sur" un objet donné.

Ce type de relation figure dans cette partie car les objets concernés sont les points, nœuds, arcs, faces et volumes (objets du niveau topologique), mais ne doit pas être comprise en tant que relation topologique puisqu'une relation suivant la verticale n'est pas toujours conservée après une déformation topologique (rotation de  $\pi / 2$  par rapport à un axe horizontal, par exemple).

Pour chacun des objets des classes citées précédemment, sont stockés tous les objets situés au-dessous et au-dessus.

## Modèle géométrique

Les objets de la partie topologique, présentés ci-dessus, sont décomposés géométriquement en simplexes afin de pouvoir envisager la gestion de tout type de formes (au moins par approximation). Les simplexes sont les objets géométriques les plus simples : point, segment, triangle et tétraèdre lorsque l'on se place dans un espace à trois dimensions.

Comme en deux dimensions, les arcs sont composés d'une liste ordonnée de 0-simplexes (points), ou d'un ensemble non forcément ordonné de 1-simplexes (segments).

En revanche, la description des faces par leurs contours ne suffit plus à les représenter correctement. En trois dimensions, l'intérieur d'une face n'est pas clairement défini par son contour. Nous devons, dans le cas de faces non planes, définir en plus des contours, les variations internes des faces.

La décomposition en triangles est une méthode simple d'approximation de tout type de surfaces. Par la suite, les utilisateurs pourront transformer ces surfaces composées de triangles "plats" en surfaces "arrondies" (pour les châteaux d'eau, par exemple).

Les volumes, objets analogues aux surfaces des modèles bidimensionnels, n'ont pas besoin d'être décomposés en 3-simplexes (tétraèdres). Cette décomposition pourrait trouver son utilité dans le calcul de volume, mais il existe une méthode de calcul qui ne prend en compte que les triangles des frontières du volume (méthode analogue au calcul d'aire des surfaces en deux dimensions).

## Schéma des modèles topologique et géométrique

### Quelques explications sur les relations de la figure B.6.5

Un nœud est extrémité finale de 0 (s'il est isolé) à n arcs orientés. Un arc orienté dispose d'un seul nœud final, il fait référence à un arc non orienté (qui permet d'accéder à la géométrie) et à un couple (s'il est bien limite d'une face).

Un arc non orienté est composé de deux arcs orientés, et fait référence à n segments (non obligatoirement ordonnés).

Une face orientée fait référence à une face non orientée (qui permet d'accéder à la géométrie ou aux objets géographiques), elle pointe également sur un unique couple (ao, fno). Les autres couples sont obtenus via la relation  $\alpha 2$ . Une face peut composer la frontière d'un volume ou d'un trou volumique.

C'est au niveau de la face non orientée qu'est stockée l'information trou-surfacique puisque qu'une telle caractéristique concerne équitablement les deux côtés de la face.

Un couple (ao, fno) dispose de son couple suivant avec face invariante (couple obtenu par  $\alpha 2$ ), de son couple suivant avec arc invariant (obtenu par  $\sigma$ ), et de son couple inverse (obtenu par  $\alpha 3$ ). Chaque couple fait référence à son arc orienté ainsi qu'à sa face orientée.

Un volume fait référence à uniquement une face orientée de sa frontière. Les autres s'obtiennent grâce aux fonctions sur les couples. Un volume peut être troué par n cavités ou trous débouchants.

Les trous débouchants et volumiques ne font référence qu'à un seul volume. Les trous surfaciques font également référence à une seule face, mais grâce à la relation  $\sigma$  sur les couples, il est possible de retrouver toutes les faces trouées par cet unique trou.

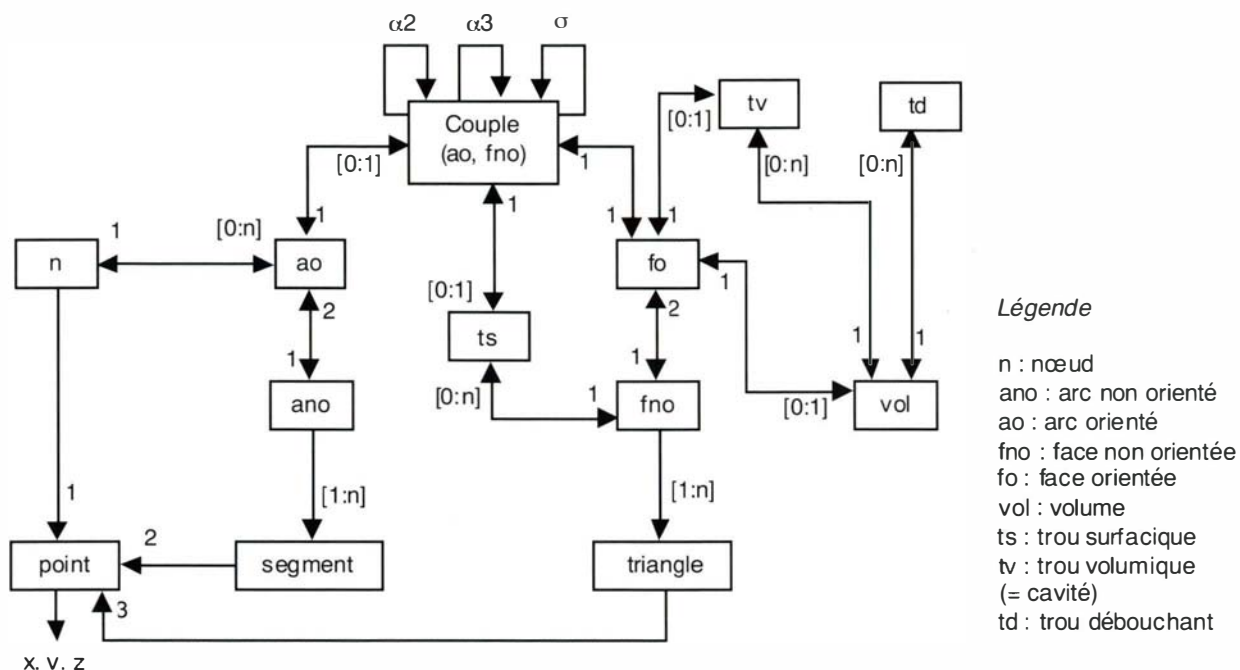


figure B.6.5 : schéma des modèles topologique et géométrique

## Modèle géographique

Le niveau de simplification des spécifications des objets géographiques a été défini de telle sorte que les hauteurs de bâtiments ne soient pas négligeables, mais sans rentrer dans les détails internes aux bâtiments, représentés en architecture.

L'échelle (ou niveau de simplifications) de la base devra alors tourner autour du 1 : 5 000. Avec ce choix d'échelle, on pourra alors partir de l'actuelle BD Topo en 2-D1/2 et en imaginer une extension 3-D.

Les spécifications définiront enfin des objets avec une représentation plus proche de la réalité puisqu'ils ne seront plus "aplatis".

## Quelques exemples de classes d'objets géographiques (tableau B.6.1)

Bâti : objet surfacique simple 2-D transformé en un objet complexe 3-D, composé de planchers, murs et toits. Le bâti 3-D ne peut pas être modélisé comme un simple volume car on peut rencontrer des bâtiments ouverts non volumiques (c'est le cas pour des hangars, par exemple).

L'utilisation d'objets surfaciques orientés permet ici de savoir de quel côté se situe le bâtiment. Un mur non orienté signifie qu'il partage deux bâtiments adjacents (figure B.6.6, ci-dessous).

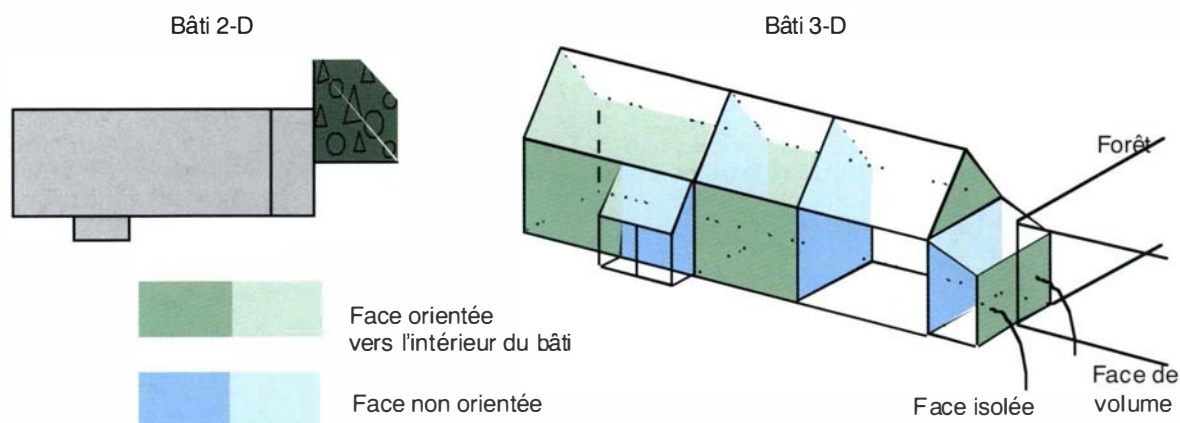


figure B.6.6 : classe bâtiment

Cependant, il reste certains objets abstraits (unités administratives) qui peuvent poser problèmes puisqu'ils dépendent largement de la dimension du support de leurs représentations. Une commune n'a été représentée que sur une carte (papier en deux dimensions), et depuis toujours cet objet est bidimensionnel.

Deux possibilités s'offrent à nous : soit, on gère une couche tridimensionnelle, puis une autre couche bidimensionnelle pour les communes (multidimensionnel proposé par [CAMBRAY 94], soit on modifie la définition des unités administratives, afin de les introduire dans la base en tant qu'objets 3-D. Nous avons préféré redéfinir des unités administratives 3-D, car le monde réel est entièrement composé d'objets plongés dans un espace à trois dimensions.

Certes, ces unités administratives sont des objets imaginaires, mais leurs limites reposent souvent sur des objets géographiques bien réels (cours d'eau, lignes de crête, etc.). On ne doit donc pas déconnecter ces objets imaginaires de ceux du monde réel.

On s'est arrêté sur une modélisation surfacique partageant la géométrie avec l'objet géographique terrain pour ne pas créer d'objets géométriques supplémentaires. Il est alors possible de calculer la surface réelle de chaque commune, et par une projection, d'en calculer l'aire 2-D. Les objets appartenant à une commune donnée sont les objets qui partagent la géométrie de la commune, les objets qui sont situés au-dessous ainsi que les objets situés au-dessus de la surface définissant la commune.

Une autre modélisation, encore plus correcte que la précédente, consiste à voir les communes comme des objets volumiques. En effet, il existe une limite basse et une limite haute (suivant la verticale) de ces unités administratives. La surface communale est alors obtenue très aisément. Les objets qui sont dans la commune sont ceux qui sont inclus (totalement ou en partie) dans le volume communal.

**tableau B.6.1 : extension 3-D de quelques classes d'objets 2-D**

Classe d'objets	Modélisation en deux dimensions	
Forêt	Objet surfacique	Objet volumique
Lignes électriques	Linéaire (sur le terrain)	Linéaire (au-dessus du terrain)
Pylônes	Ponctuel	Linéaire
Lacs	Surfacique	Surfacique (si le fond est inconnu), Volumique (si le fond est connu)
Barrages	Linéaire	Surfacique
Ponts	Linéaire	Complexe (composé de piles, tabliers, etc).

## L'implémentation

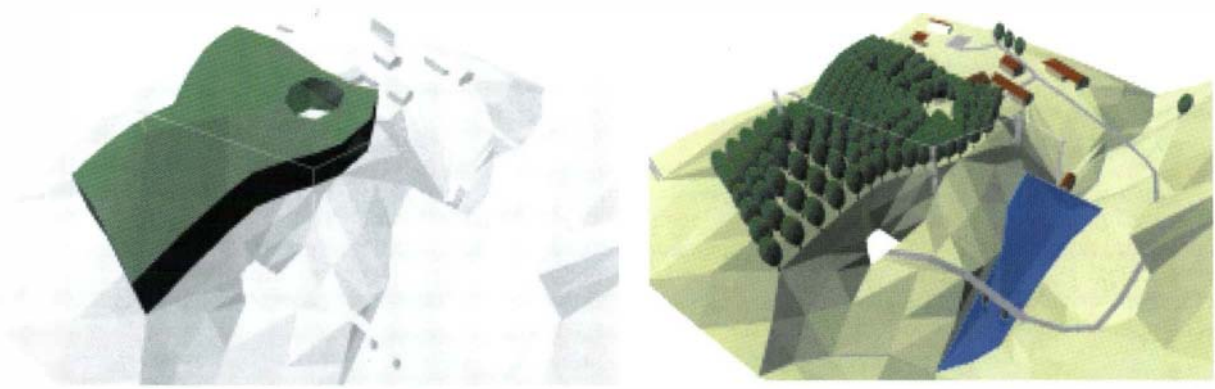
### Sur le SGBD O 2

- Le laboratoire COGIT, section bases de données géographiques, dispose d'un prototype de système d'information géographique en deux dimensions, GéO2 [DAVID et al 92], implémenté sur le système de gestion de bases de données orientées-objets O2. Ce système est susceptible de recevoir des sur-couches pour pouvoir gérer, entre autres, la troisième dimension.
- Une telle sur-couche doit donc hériter de classes déjà existantes en deux dimensions. Nous avons remarqué de fortes ressemblances entre certaines classes 2-D et 3-D : arcs orientés 2-D ↔ faces orientées 3-D, faces 2-D ↔ volumes 3-D, du point de vue topologique, mais aussi arêtes 2-D ↔ arêtes 3-D, faces 2-D ↔ faces 3-D du point de vue géométrique. On pourrait alors imaginer un double héritage pour certaines classes d'objets 3-D : faces 3-D héritant à la fois de faces 2-D (pour la géométrie) et d'arcs 2-D (pour la topologie). Mais, vu la complexité du modèle 2-D existant et de la mise en œuvre d'une telle sur-couche 3-D, nous avons préféré développer un modèle 3-D entièrement disjoint [FLEURY 98].
- Une fois les données entrées dans la base, on peut leur appliquer divers filtres géométriques (distance entre objets, longueur, surface, volume), topologiques (adjacence, inclusion, trou ou tout autre combinaison), et sémantiques (sélection suivant des attributs alphanumériques comme le nom du propriétaire, le nombre voies, le type de culture, etc).

### La visualisation

Cette application permettra d'afficher la base de données et les résultats de requêtes autrement qu'au moyen d'une liste peu parlante d'objets géographiques. Notre objectif est d'exporter un ensemble de données géométriques et sémantiques dans un certain format afin de les utiliser avec un outil permettant l'affichage de données 3-D. Le format VRML (Virtual Reality Modelling Language) répond tout à fait à nos attentes : visualisation interactive, possibilités de gérer des liens vers d'autres fichiers (HTML, VRML), et c'est d'autre part le format 3-D pour l'échange de données sur Internet (au même titre que HTML pour le texte).





**figure B.6.7 : forêt avant et après transformation**

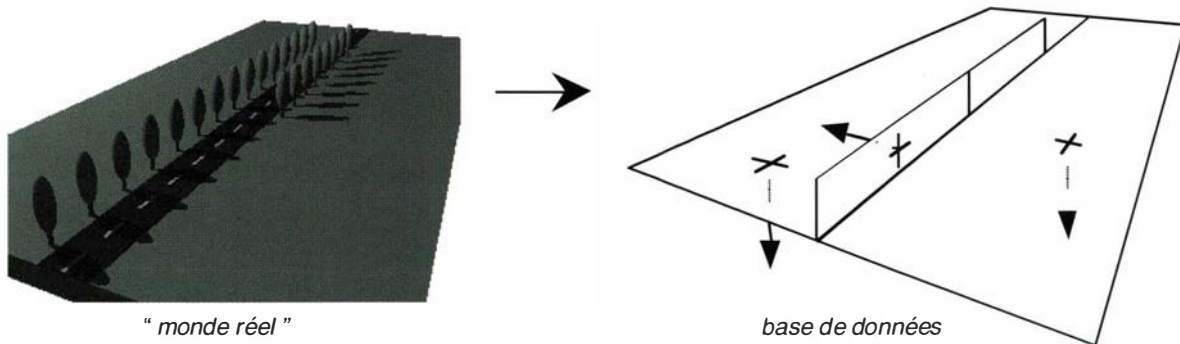
Les concepteurs de scènes en réalité virtuelle tentent de réaliser des images les plus proches possible de ce que l'on pourrait rencontrer dans la réalité. Nous ne souhaitons pas en arriver jusque-là, mais il nous faut juste reconnaître sans ambiguïté les objets géographiques affichés. Pour cela, nous avons transformé certains d'entre eux pour leur donner une signification plus claire. C'est le cas des forêts qui au niveau de la base de données sont modélisées par des volumes.

Une forêt volumique est exportée en VRML en un ensemble d'arbres posés sur le sol. La représentation n'est certes pas très réaliste, mais on arrive à distinguer au premier coup d'œil qu'il s'agit bien d'une forêt. Notre objectif est donc atteint (voir figure B.6.8) [DE LA LOSA, CERVELLE 99b].

## Requêtes

Les données stockées dans la base peuvent être sélectionnées au moyen de requêtes de style géométrique, topologique ou bien sémantique (ou une combinaison des trois).

La première requête présentée ci-après est une requête très simple : on veut sélectionner les forêts qui se situent à moins de  $x$  mètres d'une ligne électrique (pour que la faune puisse évoluer à l'abri d'un champ magnétique trop élevé, par exemple). Cependant, cette requête pouvait être traitée sans aucune difficulté sur une base en deux dimensions. On peut alors s'interroger sur l'apport de la troisième dimension. La différence entre ces deux requêtes (2-D et 3-D) se verra sur les résultats. Certaines forêts, qui figurent dans le résultat sur la base 2-D, ne seront pas sélectionnées par la requête 3-D puisque bien situées à une distance supérieure à  $x$  (distance qui tient compte de la troisième dimension). Dans cet exemple, la représentation tridimensionnelle apportera une réponse plus vraisemblable que sur une base 2-D.



**figure B.6.8 : modélisation des rangées d'arbres**

Autre exemple avec une requête topologique : on souhaite retrouver toutes les rangées d'arbres situées sur la droite de la route Y depuis A jusqu'à B.

On modélise les routes par leur axe, les rangées d'arbres bilatérales par une face non orientée, et les rangées d'arbres unilatérales par une face orientée (voir figure B.6.8, ci-dessus). L'obtention des rangées d'arbres situées sur la droite d'une route orientée peut facilement s'effectuer au moyen des informations topologiques. A partir de la route en question, on récupère l'ensemble des arcs non orientés qui la composent. Ensuite, grâce au point de départ, on est en mesure d'orienter chacun des arcs ; on obtient alors un ensemble du type  $\{ao\}$ . Sur chacun de ces arcs orientés  $ao$ , et grâce aux couples (arc orienté, face non orientée), on récupère toutes les faces orientées dont  $ao$  est un des arcs orientés du contour. Les rangées d'arbres à droite sont tout simplement les faces orientées qui font référence à une rangée d'arbres unilatérale. Les rangées d'arbres à gauche sont celles qui sont à droite pour le sens B vers A.

Cette requête, simple à résoudre en 2-D (les rangées d'arbres à droite sont des arcs orientés dans le même sens que la route de A vers B), ne doit pas non plus poser de problème en trois dimensions, malgré le changement de spécification des objets. Dans cet exemple, on a pu distinguer certains objets à droite, mais cette notion de gauche/droite ne peut pas être utilisée comme en deux dimensions. En effet, sur une base 2-D, on est toujours capable,

à partir d'un arc orienté, de donner sa face à droite et sa face à gauche, alors qu'en 3-D, il sera très difficile de distinguer les faces droite et gauche d'un arc vertical.

En revanche, le principe de face à droite en 2-D est identique à celui de volume à droite d'une face orientée en 3D (à droite = du bon côté). Cela provient du fait qu'un hyperplan (de co-dimension 1) sépare l'espace en exactement deux demi-espaces de co-dimension 0 [DE LA LOSA, CERVELLE 99a].

Le dernier exemple va consister à trouver les différents objets rencontrés lors du percement d'un tunnel. Premièrement, il va s'agir de construire géométriquement le tunnel, puis de reconstituer la structure topologique au voisinage du nouvel objet. Une fois ces deux opérations réalisées, il est maintenant possible d'effectuer des requêtes sur les objets existants : connaître le type de roche à percer (données volumiques reconstruites par interpolation sur les forages et grâce aux cartes d'affleurement existantes), les réseaux enterrés à modifier (données pouvant provenir des compagnies d'électricité, de gaz, de télécommunication, d'eau, etc.).

## Suites

Le modèle a donc été implémenté sur le SGBD O2. Des données peuvent alors être manipulées puis visualisées. Cependant, afin de rendre ce système complètement exploitable, la construction de la topologie doit être automatisée. Seules les données géométriques et sémantiques doivent être fournies au SIG. Ensuite, c'est au système de construire les objets de la partie topologique (nœuds, arcs, faces, volumes, etc.) en intersectant les simplexes de la partie géométrique avec les objets géographiques. Puis, toujours à partir de la géométrie, le système devra reconstruire les relations topologiques entre ces nouveaux objets intermédiaires. On doit également songer à la transformation d'une base 3-D vers une base 2-D pour les utilisateurs désireux de travailler avec des données en deux dimensions. Cette transformation sera également fort utile pour la production de cartes papier (papier : support toujours en deux dimensions).

Pour réaliser cette tâche, on dispose de deux méthodes principales :

- découpage de la base en classes d'objets géographiques, et pour chacune des classes, prévoir une méthode pour obtenir des objets en deux dimensions. Par exemple, pour la classe bâti, ne conserver que les toits, puis supprimer leur troisième dimension. Cela implique qu'il faut prévoir une méthode pour chacune des classes, et que la création d'une nouvelle classe d'objets 3-D induira obligatoirement la création d'une nouvelle méthode 3-D → 2-D propre à cette classe,
- suppression de la troisième dimension de chaque point de la partie géométrique. On obtiendra alors des simplexes de même dimension, ou de dimension immédiatement inférieure (pour un segment vertical, par exemple). Il faudra ensuite recréer une structure topologique bidimensionnelle grâce à un système d'information géographique 2-D. Par ailleurs, les liens entre géométrie et sémantique sont conservés tout au long de la transformation. Les objets géométriques 2-D feront donc toujours référence à des objets géographiques.

## Références

[CAMBRAY 94] Béatrix de Cambray : *Étude de la modélisation, de la manipulation et de la représentation de l'information spatiale 3-D dans les bases de données géographiques*, thèse de doctorat de l'Université de Paris-6, soutenue le 24 octobre 1994.

[DAVID 91] Benoît David : *Modélisation, représentation et gestion de l'information géographique, une approche en relationnel étendu*, thèse de doctorat de l'Université de Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 910016/S-THE, soutenue le 8 juillet 1991.

[DAVID et al 92] Benoît David, Laurent Raynal & Guylaine Schorter : *Prototype de SGBD Orienté-Objet localisé*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 61, 1992.

[RAPER 89] : *Three dimensional applications in Geographical Information Systems*, sous la direction de Jonathan Raper, Taylor & Francis 1989.

[VERBREE, VERZIJL 98] : Edward Verbree & Lisette Verzijl : *Integrated 3-D-GIS and VR, Use of Virtual Reality and 3-D-GIS within the Planning Process Concerning the Infrastructure*, in Proceedings of the 1st International Conference GIS PlaNET'98, Lisbon (Portugal), 7-11 september, 1998.

## Publications

[DE LA LOSA 98] Arnaud de la Losa : *Towards a 3-D GIS. From 2-D GIS and 3-D CAD, Conception of a 3-D GIS with a Complete Topological Management*, in Proceedings of the 1st International Conference GIS PlaNET'98, Lisboa (Portugal), september 7-11, IGN-SR 980021/S-COM, 1998.

[DE LA LOSA, CERVELLE 99a] Arnaud de la Losa & Bernard Cervelle : *Présentation d'un modèle 3-D et analogies avec un modèle 2-D*, in Revue Internationale de Géomatique (à paraître), IGN-SR 99003/S-ART, 1999.

[DE LA LOSA, CERVELLE 99b] Arnaud de la Losa & Bernard Cervelle : *Queries and visualization with a 3-D GIS prototype*, in Computers & Graphics (à paraître), IGN-SR 99004/S-COM, 1999.

[FLEURY 98] David Fleury : *Implémentation d'un modèle géographique 3-D*, rapport de stage DESS-GLA, IGN-SR 980018/S-STA, 1998.

## B.7 Un modèle de rôles pour mettre en correspondance un besoin d'utilisateur et des données géographiques

Bénédicte Bucher

### Objectif

L'objectif de cette recherche est de guider un utilisateur potentiel dans le choix de données géographiques nécessaires pour répondre à un besoin particulier, et accessibles sur réseaux.

Cet accès d'un utilisateur à de l'information géographique en ligne constitue une étape dans la réalisation de l'interopérabilité. Nous allons présenter cette problématique plus généralement et positionner ce travail par rapport aux démarches dans ce domaine. Dans le contexte du Web, plusieurs techniques sont mises en œuvre pour faciliter la recherche d'information. Nous les passerons en revue, pour ensuite présenter notre démarche et les principes du système que nous envisageons.

Une particularité importante de notre approche, est la réalisation d'une ontologie de tâches s'appuyant sur un modèle de rôles pour faire le lien entre le besoin de l'utilisateur et les données géographiques. Nous montrerons les premiers éléments du modèle de rôles et le principe de fonctionnement d'un tel modèle.

### Le contexte de cette recherche : l'interopérabilité

#### Un besoin et des réponses

La multiplication des données géographiques et le développement des techniques de communication et de manipulation de l'information ont fait naître des besoins pratiques liés à la manipulation de l'information géographique. Le terme interopérabilité renvoie à une situation idéale où les activités d'exploitation de cette information seraient possibles sans obstacles liés aux formalismes utilisés pour acquérir cette information, la stocker et la manipuler dans des traitements informatiques.

Cette notion d'interopérabilité ne concerne pas seulement un utilisateur final mais également les producteurs de données et les vendeurs de logiciels. En effet, le manque d'interopérabilité se traduit, entre autres, par de la perte d'informations lors du transfert de données, par des impossibilités d'accéder à des données ou de les utiliser, par des duplications d'efforts de constitution de jeux de données, et cela freine l'extension du marché de l'information géographique.

De nombreuses démarches veulent mettre en place une interopérabilité correspondant à des points de vue différents. Des vendeurs de logiciels ou des promoteurs de technologie veulent améliorer la communication entre des systèmes implémentés (les spécifications de l'Open GIS Consortium [OGC 98], la Common Object Request Broker Architecture).

Des organismes institutionnels de standardisation veulent éliminer les obstacles au développement du marché de l'information géographique (ISO/TC211, CEN/TC287). La question de répertorier les ressources existantes et de les présenter à un utilisateur est abordée dans les standards de métadonnées comme nous le verrons plus loin. Des recherches sont entreprises sur l'utilisation de plusieurs ressources hétérogènes et les problèmes d'interopérabilité sémantiques [BISHR 97].

#### Un nouvel enjeu

Dans le domaine de l'interopérabilité, les réels problèmes ne sont plus seulement techniques. Il s'agit d'un enjeu économique énorme : le contrôle de la distribution de l'information géographique.

L'OpenGIS Consortium, consortium américain, veut mettre en place des spécifications d'interfaces de systèmes d'information géographique, SIG, en vue de réaliser une interopérabilité entre ces SIG. Ce consortium a beaucoup d'audience auprès d'organismes officiels de standardisation et s'intéresse de près aux autres démarches en interopérabilité.

Or les intérêts de vendeurs de logiciels ne sont pas nécessairement convergents avec ceux des utilisateurs de ces logiciels et des producteurs de données. Par exemple, ils ne se soucient pas des spécificités locales dans le domaine des données géographiques de référence. En particulier, il y a de nombreuses bases de données de référence européennes, et parmi elles des hétérogénéités. Ces bases ont souvent une richesse de contenu et de structure spécifique.

#### La démarche : considérer l'interopérabilité pour les utilisateurs

La Commission Européenne a souligné de façon plus générale le besoin d'outils pratiques pour faciliter aux utilisateurs l'accès en ligne à l'information du secteur public [DGXIII 99].

En Europe, où il existe de nombreuses bases de données, il est particulièrement difficile d'utiliser des données géographiques, par exemple, de monter un projet SIG, entre autre, parce qu'il y a de nombreux interlocuteurs à contacter pour choisir le lot de données adéquat. Certains utilisateurs potentiels trouvent de plus les données trop chères car, ne sachant pas comment les utiliser, ils envisagent d'acheter plus de données que nécessaires. Par ailleurs, les données sont insuffisamment exploitées.

L'interopérabilité que nous souhaitons est la possibilité pour un utilisateur d'accéder à des données et traitements sur réseau, et de les utiliser, éventuellement en les combinant, de façon transparente et sans perte d'information dommageable.

On peut parler à ce propos d'interopérabilité ouverte de l'information, c'est-à-dire son aptitude à communiquer *a priori* avec un acteur quelconque. Ce n'est pas l'interopérabilité en cercle mise en place lorsque plusieurs acteurs s'accordent sur le respect de certaines règles, cette dernière ne donne aucune garantie sur la communication avec un nouvel acteur.

## **Faciliter l'accès en ligne d'utilisateurs à l'information contenue dans nos bases de données**

### **La recherche d'informations en ligne**

#### **Généralités**

Le Web relie de nombreux internautes aux profils variés à un foisonnement anarchique, c'est-à-dire non organisé, d'informations en ligne. La recherche d'informations y est essentielle et a donné lieu à de nombreuses démarches.

Un " lieu de recherche ", qui est souvent un site dédié à l'exploration d'un type de ressources ou un moteur de recherche plus général, s'appuie sur les techniques suivantes :

- un mode d'expression du besoin d'information du solliciteur,
- une description homogène des ressources, associée à une indexation,
- une méthode de mise en rapport des deux, pour optimiser le choix d'une ressource répondant à la requête.

#### **L'utilisation de mots-clés et le renseignement de champs**

La technique la plus répandue est celle des moteurs de recherche élémentaires. Ils décrivent les ressources par les mots figurant dans leurs fichiers HTML et créent des index associant à un mot la liste des URLs des ressources correspondantes. L'utilisateur est invité à exprimer son besoin d'information par un ou plusieurs mots-clés. C'est un procédé simple et efficace, dont les limites sont tout de même évidentes : il présuppose un accord du solliciteur et des producteurs des ressources sur le sens des mots utilisés. De plus certaines requêtes ne peuvent pas s'exprimer simplement à l'aide de mots-clés.

Pour comprendre les problèmes inhérents à la recherche d'information un exemple simple est un site de bibliothèque. Les ressources HTML indexées dans ce site sont les fiches descriptives des ouvrages. Si une personne cherche un livre écrit par Alain, une requête par mot-clé " alain " lui fournira, non seulement les livres écrits par Alain, mais aussi les livres d'auteurs dont le prénom est Alain, et des livres dont le titre comporte ce mot. Pour remédier à cela, on utilise le renseignement de champs : la requête devient " un livre dont le champ *nom de l'auteur* a pour valeur " alain ".

Ce mode de recherche s'appuie sur une description des ouvrages non pas par les mots de leur fiche mais par des métadonnées du type (champ, valeur). Des standards de telles métadonnées, par exemple, le Dublin Core [WEIBEL et al 95], sont mis en place pour permettre aux créateurs de ressources de les décrire de façon homogène, ce qui est nécessaire à l'exploitation de ces descriptions par un système de recherche.

#### **L'utilisation d'un corpus de connaissances interne au système de recherche**

La technique précédente ne peut permettre de répondre à une requête comme " je cherche des livres de disciples d'Heidegger ". En effet, dans les fiches des livres recherchés, de même que dans leurs métadonnées, le mot Heidegger ne figure pas nécessairement. Pour permettre à un utilisateur d'exprimer ce type de requête, le site de la bibliothèque doit connaître les liens *est-disciple-de* entre les valeurs possibles du champ auteur. C'est-à-dire que le système de recherche doit avoir une base de connaissance lui permettant de relier l'expression de la requête aux descriptions des ressources disponibles.

Ontoseek est un prototype de système de recherche d'information sur Internet s'appuyant sur un corpus de connaissances qui lui est propre [BORGIO et al 97]. Ce système est dédié à la recherche de composants orienté-objets et son corpus de connaissances est une description fonctionnelle des composants disponibles, soit encore une ontologie des composants orienté-objets.

Ontoseek permet à l'utilisateur d'éditer un graphe sémantique décrivant ce que le composant recherché doit faire, par exemple : ouvrir une fenêtre affichant un certain message. Le recours à un dictionnaire en ligne permet de

lever les ambiguïtés sémantiques. La méthode de mise en rapport de la requête et des ressources disponibles est l'appariement de graphes.

En Intelligence Artificielle, lorsqu'on cherche à saisir dans une représentation formelle ce qui est important dans un certain contexte, on construit des ontologies. Ce sont des systèmes de catégories d'objets, comportant les propriétés essentielles de ces objets et leurs relations entre eux. L'ontologie est plus généralement la science de ce qui existe. Cette science produit des descriptions du monde qui sont appelées ontologies, et qui cherchent en général à être exhaustives dans un domaine déterminé comme, par exemple, une ontologie médicale.

## **Bilan : de systèmes de recherche de données à des systèmes de recherche de connaissances**

Les chercheurs du projet CommonKADS portant sur l'ingénierie de connaissances expliquent la distinction entre des données, de l'information et des connaissances de la façon suivante [SCHREIBER et al 93].

- Des données sont des signaux, par exemple, ceux que nos sens perçoivent immédiatement ou ceux qui sont codés. " ...---... " est une donnée.
- Lorsque des données sont accompagnées d'une signification, elles deviennent de l'information. " ...---... " s'interprète la plupart du temps comme " SOS ".
- La connaissance est un ensemble de données et d'informations qui permettent à une personne d'agir, par exemple de mener une activité de raisonnement et une activité physique. La connaissance liée à l'information " SOS " est : " ceci est un signal de détresse, je dois me porter au secours de personnes en danger ".

Un système de recherche par mot-clés est un système de recherche de donnée. En effet, ce système possède l'équivalent d'une base virtuelle de données numériques, les fichiers HTML, qui sont représentées par leurs URLs et sont indexées par des clés simples : les mots qui les composent.

Un système de recherche s'appuyant sur les métadonnées est un système de recherche d'informations car les clés de recherche possèdent une sémantique. Mais il reste en interne un système de recherche de données pour lequel une donnée est un bloc de métadonnées décrivant une ressource.

Un système de recherche fonctionnant à l'aide d'une base de connaissances interne est également un système de recherche d'information. Il ne fonctionne pas comme un système de recherche de données puisqu'il interprète effectivement une recherche d'information en une recherche de données.

Le système Ontoseek est encore plus perfectionné. En effet, il permet d'exprimer une requête non pas par des informations descriptives portant sur la ressource mais par des informations sur son utilisation. D'une certaine façon, Ontoseek devient un système de recherche de connaissances. Dans la suite, nous n'utiliserons pas ce terme.

## **La recherche d'information géographique, les descriptions disponibles**

Il existe des métadonnées géographiques, mais elles ont été développées dans un contexte différent de celui de la recherche d'information : celui de la manipulation des données, de leur gestion par le producteur ou de leur transfert. Elles portent sur le contenu des données, sur les modalités d'utilisation et sur leur validité [LATAILLADE 97].

Elles sont utilisées dans des catalogues, mais elles ne visent pas à faciliter la compréhension que l'utilisateur peut avoir des données. Bien plus, la nécessité de faciliter le transfert de données conduit à l'adoption de formalismes entravant encore davantage la compréhension de l'utilisateur [KUHN 96].

L'expérience de l'Alexandria Digital Library [GOODCHILD 95], a montré que les métadonnées n'étaient pas suffisantes et que les utilisateurs avaient également besoin d'exprimer des requêtes par des exemples et d'avoir une interface avec des profils d'utilisateurs.

En définitive, un utilisateur ne peut pas traduire soi-même sa recherche d'information en recherche de données. Les données ne deviennent de l'information que lorsqu'elles sont interprétées par un système ou un utilisateur. Cette interprétation nécessite de connaître les spécifications de contenu et dépend également du savoir d'experts et du contexte de l'utilisation.

Certains chercheurs cherchent à identifier des connaissances géographiques, dites de sens commun, partagées par tous, par exemple pour réaliser des SIG intuitifs [EGENHORFER 95] [MARK et al 97]. Ils construisent des ontologies géographiques. De telles tentatives sont très complexes en raison de la nature particulière de l'information géographique qui se prête mal à une tentative de représentation universelle [SMITH, MARK 98].

De plus l'usage de données est lié dans la pratique à l'usage de traitements SIG, que ce soit une interface cartographique ou un outil d'analyse spatiale. Le choix de données dépend des traitements que l'on veut effectuer.

Un site de recherche d'information géographique devrait donc corrélérer les descriptions suivantes :

- les traitements SIG existants,
- les bases de données géographiques disponibles
- et le domaine d'application formant éventuellement le contexte de l'utilisateur.

## L'approche

### Le principe : décrire les ressources par les utilisations qui peuvent en être faites

Nous tenons compte des remarques précédentes pour chercher à élaborer un système de recherche de données géographiques qui se présente comme un mode de recherche d'informations extractibles de données géographiques. Pour cela, nous nous appuyons non pas sur une description du contenu des bases de données mais sur une description des utilisations possibles des données. Si on se reporte à ce qui est expliqué au paragraphe Bilan, page précédente, nous cherchons à permettre à l'utilisateur d'exprimer son besoin de données géographiques comme un besoin de connaissance.

Ce type de description remplit particulièrement bien le critère d'homogénéité par rapport aux ressources et permet à l'utilisateur de s'exprimer en termes qu'il comprend : il décrit son problème à partir de problèmes généraux stockés dans le système et le système traduit ce problème en besoin d'information géographique, cf figure B.7.1.

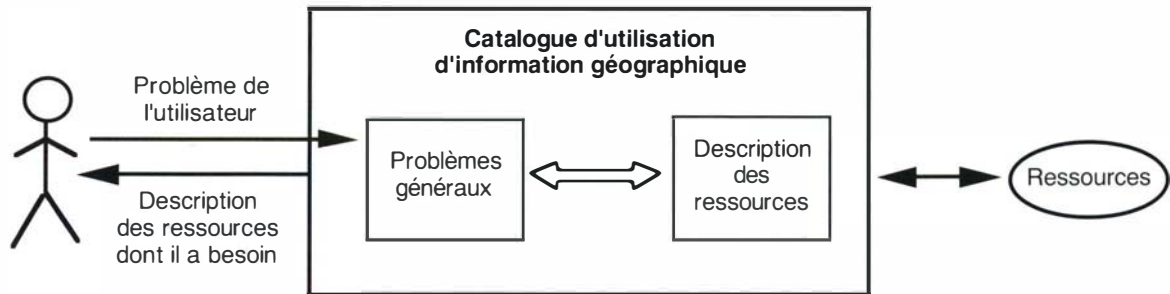


figure B.7.1

*Principe utilisé pour faciliter l'accès des utilisateurs aux ressources : un catalogue dont les index, c'est-à-dire le langage d'expression de la requête de l'utilisateur sont des utilisations possibles des données. Les ressources sont des bases de données géographiques et des traitements SIG. Ce schéma est très général et certaines interactions que nous présenterons plus loin n'y figurent pas.*

Un tel système s'appuie sur une ontologie particulière qui n'est pas une ontologie de domaine, c'est-à-dire une description d'un domaine partagée par plusieurs acteurs, mais une ontologie de tâches que nous introduirons plus loin [CHANDRASEKARAN et al 98].

De telles ontologies sont utilisées en Intelligence Artificielle pour permettre à un utilisateur, expert dans un domaine d'application, d'accéder à des outils d'un domaine qu'il ne connaît pas bien, comme le traitement d'image par exemple. Nous considérons donc ici que l'information géographique est un outil et prend son sens dans les utilisations qui en sont faites.

### Originalité technique de cette approche : l'utilisation de connaissances de résolution de problème

Pour aider l'utilisateur à discriminer l'information dont il a besoin en fonction de l'énoncé de son objectif, le système va posséder des connaissances de résolution du problème. Un résolveur de problème classique est dédié à la résolution d'un problème général ; par exemple, le calcul d'itinéraire en métro.

Le système invite l'utilisateur à entrer des données de son cas particulier, dans notre exemple la station de départ et celle d'arrivée. Elles permettent de représenter le problème particulier de l'utilisateur comme une instance du problème général stocké dans le système. Le système a alors une connaissance interne de ce problème particulier et peut lui appliquer sa méthode de résolution. Il fournit alors à l'utilisateur la solution de ce problème particulier.

Le catalogue fonctionne en partie selon ces principes :

- l'utilisateur identifie un index du catalogue, c'est-à-dire un problème général stocké dans le système, tel que son problème particulier en soit une instance,
- le système possède des connaissances de résolution de ce problème général et sait quelles données d'entrée doivent être demandées à l'utilisateur et quelles sont les données géographiques nécessaires pour résoudre ce problème,
- le système fournit en sortie à l'utilisateur d'une part une description (à un niveau d'abstraction que nous devons définir) de l'application qui lui permettra de résoudre son problème, et d'autre part la caractérisation des lots de données qui lui sont nécessaires pour construire cette application.

Ce fonctionnement est encore trop simple : il ne peut y avoir suffisamment d'index d'entrée pour que l'interaction entre le système et l'utilisateur soit réduite à cela. Il faut à partir de problèmes très généraux amener l'utilisateur à spécifier peu à peu son problème pour que le système en ait une description interne suffisante et puisse, en fonction de ce qu'il sait sur les données disponibles, élaborer la caractérisation d'une application solution.

## Les limites de ce travail

Nous faisons ici une hypothèse importante : l'utilisateur a une idée suffisamment précise de son problème, il est capable d'expliciter ses besoins. Par ailleurs, ne pouvant encore réaliser un catalogue exhaustif permettant d'exprimer tout problème - à un certain niveau de généralité -, nous chercherons plutôt à ce qu'il soit flexible et puisse être enrichi.

Ce système ne résoudra *a priori* pas le problème. En effet on se situe à un certain niveau conceptuel et non encore à celui des données. Dans la réalisation d'un projet il y a toujours des contraintes liées aux données et au matériel, et des contraintes de gestion de projet, qu'on ne cherche pas ici à assumer.

Enfin, ce travail de thèse ne peut avoir pour objectif la réalisation de la structure présentée ici dans son ensemble. Il faudra donc délimiter le chantier de la thèse permettant qu'elle contribue à son élaboration.

## La structure théorique du système envisagé

L'Intelligence Artificielle, en particulier l'Acquisition et la Représentation de Connaissances, a beaucoup étudié l'implémentation de systèmes possédant des " connaissances de résolution ".

Nous reprenons donc des principes de l'Acquisition des Connaissances en adoptant le vocabulaire d'un projet européen faisant référence dans ce domaine : CommonKADS [SCHREIBER et al 93].

Ce vocabulaire donne à des mots du langage courant, comme tâche par exemple, des acceptions différentes de celles auxquelles nous sommes habitués.

De façon très générale, on distingue, dans les connaissances mises en œuvre lors de la formulation et de la résolution d'un problème deux types de connaissances :

- le " savoir-que " est la description que l'on fait du monde, de notre domaine d'intérêt,
- le " savoir-comment " porte sur la manipulation des éléments de cette description en vue de produire de nouveaux énoncés descriptifs. Le " savoir-comment " se décompose lui-même en trois types : l'énoncé d'objectifs à atteindre, les stratégies et les méthodes de résolution de problème [LE ROUX 94].

Pour construire un système d'aide à la résolution de problème, on distingue plusieurs niveaux de connaissances à implémenter : le " savoir-que " du système s'implémente comme un modèle de rôles, le " savoir-comment " se décompose en opérateurs et tâches, cf. figure B.7.2.

## Les rôles

La description du monde se trouve représentée dans le système sous la forme d'un modèle des rôles. Il s'agit d'un modèle conceptuel des concepts et des relations entre ces concepts. Ce modèle est unique dans le système et ne dépend pas des applications. Sa particularité est d'exprimer le rôle joué par les objets dans leur manipulation.

## Les opérateurs

Les opérateurs permettent de manipuler les instances du modèle des rôles. Un opérateur est lié à des règles, ou encore des contraintes, qu'il doit respecter lors de ses manipulations. Ce sont les activités élémentaires de production d'information par le système. Dans le langage des systèmes-experts un opérateur correspond à un pas d'inférence.

## Les tâches

Les tâches correspondent à des problèmes généraux pour lesquels le système sait comment obtenir une solution. Ce niveau permet à l'utilisateur d'exprimer son besoin d'information géographique au système comme un cas particulier de tâche à accomplir.

Une tâche est composée de :

- *son nom*, c'est l'énoncé du but de la tâche,
- *sa stratégie*, c'est un ensemble de règles qui permettent au système de choisir en fonction du contexte une méthode parmi les méthodes de la tâche. Ce contexte est celui de l'utilisateur, la stratégie lui demande de préciser un peu plus son objectif,
- *ses méthodes*. Une méthode d'une tâche est une façon d'atteindre le but général correspondant au nom de la tâche.

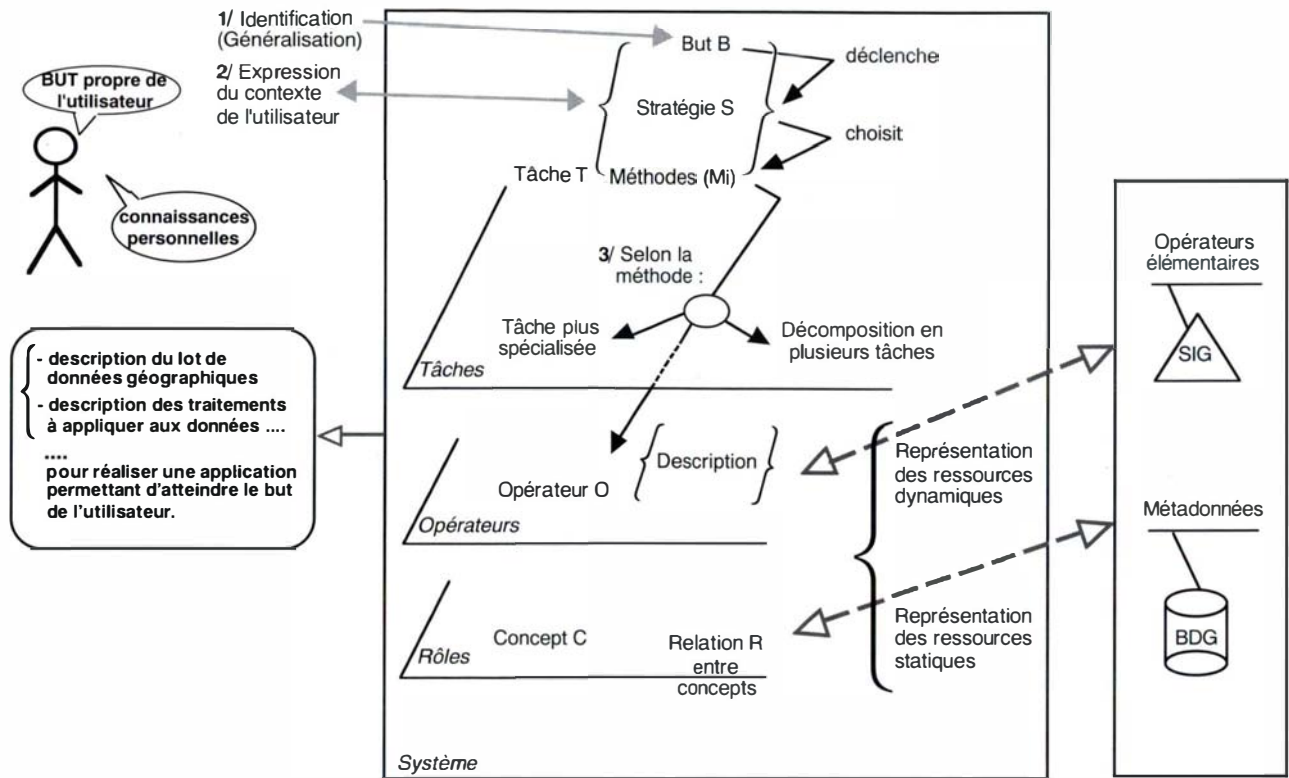


figure B.7.2 : architecture du système

L'utilisateur identifie une tâche dont le but généralise son but propre. La stratégie de cette tâche invite l'utilisateur à exprimer son contexte et à spécifier son but, et en fonction de cela choisit une méthode de la tâche.

Cette méthode peut soit : a) instancier une nouvelle tâche dont le but correspond au but spécifié, soit b) décomposer la réalisation en plusieurs tâches dont les buts deviennent des buts intermédiaires de la résolution, soit c) indiquer un enchaînement d'opérateurs permettant d'atteindre le but spécifié.

Les opérateurs manipulent des instances du modèle des rôles pour atteindre le but de la tâche. Les couches des opérateurs et des rôles permettent au système de gérer sa description des ressources géographiques numériques existantes.

## L'interface coopérative

Le terme "coopérative" signifie qu'il ne s'agit pas d'une simple interaction. Le système va s'adapter, au fur et à mesure de l'utilisation, au cas particulier de l'utilisateur en prenant en compte les interactions courantes pour décider des interactions suivantes.

L'utilisateur navigue au sein de l'ontologie de tâches pour communiquer au système, sous la forme d'un objectif à atteindre, son besoin d'information. Il faut un point de départ de cette navigation, c'est-à-dire l'identification par l'utilisateur d'un index d'entrée du catalogue, un problème général correspondant le mieux à son cas particulier. Cela peut être réalisé grâce à une présentation d'un exemple typique d'utilisation pour chaque problème général, accompagné de l'énoncé de ce problème général.

Une autre méthode plus sophistiquée consiste à construire une interface semblable à celle d'Ontoseek, c'est-à-dire un éditeur de graphe sémantique. Il faut alors que le système possède une description de ses index d'entrée sous la forme de tels graphes.

L'interface permettant au système de se représenter les ressources disponibles, et de mettre à jour cette description, sera probablement très délicate à construire et nous n'y avons pas encore réfléchi. Le système ne manipulera pas de données mais des schémas conceptuels, des nomenclatures et des métadonnées. Les nécessités de cette dernière interface donneront lieu à la définition, l'implémentation et le test de nouvelles métadonnées sur les BD de l'IGN.

Dans la suite de l'article, on s'appuie sur un cas particulier de problème demandant des connaissances géographiques pour avoir des premiers éléments de cette architecture. C'est une façon d'exhiber des tâches et rôles candidats pour notre architecture, de se donner des idées avant de construire une méthode plus formelle impliquant de vrais utilisateurs. Les grandes lignes de cet exemple sont reprises pour nous permettre d'introduire et de détailler le modèle de rôles.



# Premiers éléments du modèle des rôles

## Exhibition de tâches candidates

L'exemple de but, utilisé dans ce scénario, est la mise en place d'un ramassage scolaire. Nous ne cherchons pas à rendre compte de la manière dont ce problème est effectivement traité dans la réalité, ni à résoudre ce problème, mais à identifier des éléments décrits dans la partie précédente.

Le développement du scénario se fait en trois phases.

- Nous avons exprimé l'objectif propre de l'utilisateur, un responsable de mise en place d'un ramassage scolaire, comme ce qu'il devait nécessairement posséder à l'issue de la résolution : les journaux de route à remettre aux chauffeurs de cars.
- Autour de ce concept a été développé de façon itérative un réseau sémantique qui exprime les éléments, concepts ou relations entre concepts, qui doivent être connus, pour déterminer les éléments du réseau courant. Parmi ces éléments, certains nécessitent le recours à de l'information géographique pour leur détermination.
- Le réseau obtenu est traduit en dernier lieu en un graphe d'objectifs intermédiaires qui sont la détermination des éléments du réseau. Par exemple un objectif intermédiaire est de *déterminer les stations utiles parmi les abribus*, qui se décompose lui-même en : *déterminer les stations desservant les écoles* et *déterminer les stations desservant les élèves*. Ce dernier objectif se décompose lui-même par exemple en : *localiser les abribus* et *localiser les élèves*, puis *identifier les trajets possibles d'un élève entre la localisation de son domicile et celles des abribus*, puis *mesurer ces trajets*, puis *prendre les plus courts*.
- D'autres objectifs consistent à identifier les trajets élémentaires d'un bus entre deux stations, à mesurer ces trajets, etc.

Dans ce graphe d'objectifs intermédiaires, on remarque une sous-décomposition générique : il s'agit pour nous de tâches candidates.

Cette décomposition exhibe des concepts et des activités de base, par exemple une localisation, une navigation, le fait d'associer une localisation à une entité. Un modèle de rôles s'ébauche ainsi naturellement.

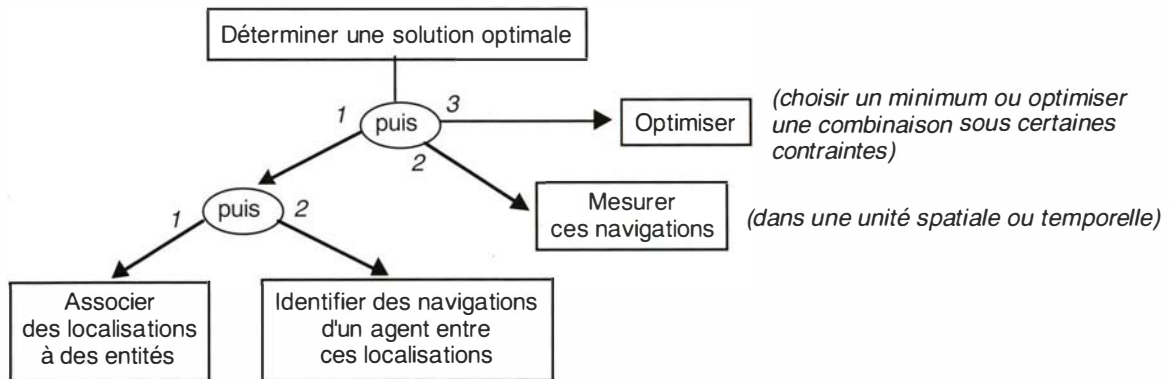


figure B.7.3 : structure de tâches et sous-tâches génériques

## Ébauche du modèle des rôles

Une *localisation spatiale* est une caractérisation liée à un *système de référence spatial* relatif à la terre, par exemple des coordonnées GPS ou un point sur une carte. Un objet géométrique d'une BDG est, dans ce modèle de rôles, une localisation.

Une *localisation temporelle* est une caractérisation liée à un *système de référence temporel*. Par exemple, une saison, une date, un segment horaire.

Une *entité* est ici une entité représentable sur une carte, par exemple une voiture, une forêt, une route. Cela peut être aussi une manifestation d'un phénomène abstrait, comme, par exemple, les déclarations d'une maladie. Les objets géographiques des BDG sont, dans ce modèle de rôles, des entités.

Une *situation* est l'association d'une entité à une localisation spatiale et une localisation temporelle. Cette notion n'est pas représentée comme une classe dans les schémas conceptuels traditionnels en information géographique. Nous avons pourtant choisi ici d'en faire une classe, abstraite, car nous avons constaté, entre autre que cela nous permettait de définir de façon efficace le concept de navigation.

Le terme *situation* a été choisi parce qu'il nous semblait plus clair que celui d'association. Selon l'entité, cette situation peut avoir une *orientation* liée à un système de référence spatiale.

Lorsque la situation est considérée comme stable dans un système de référence spatio-temporel, l'entité peut elle-même être utilisée comme une localisation spatiale liée à ce système. Cela peut être la Tour Eiffel, une voiture garée, une place dans un train.

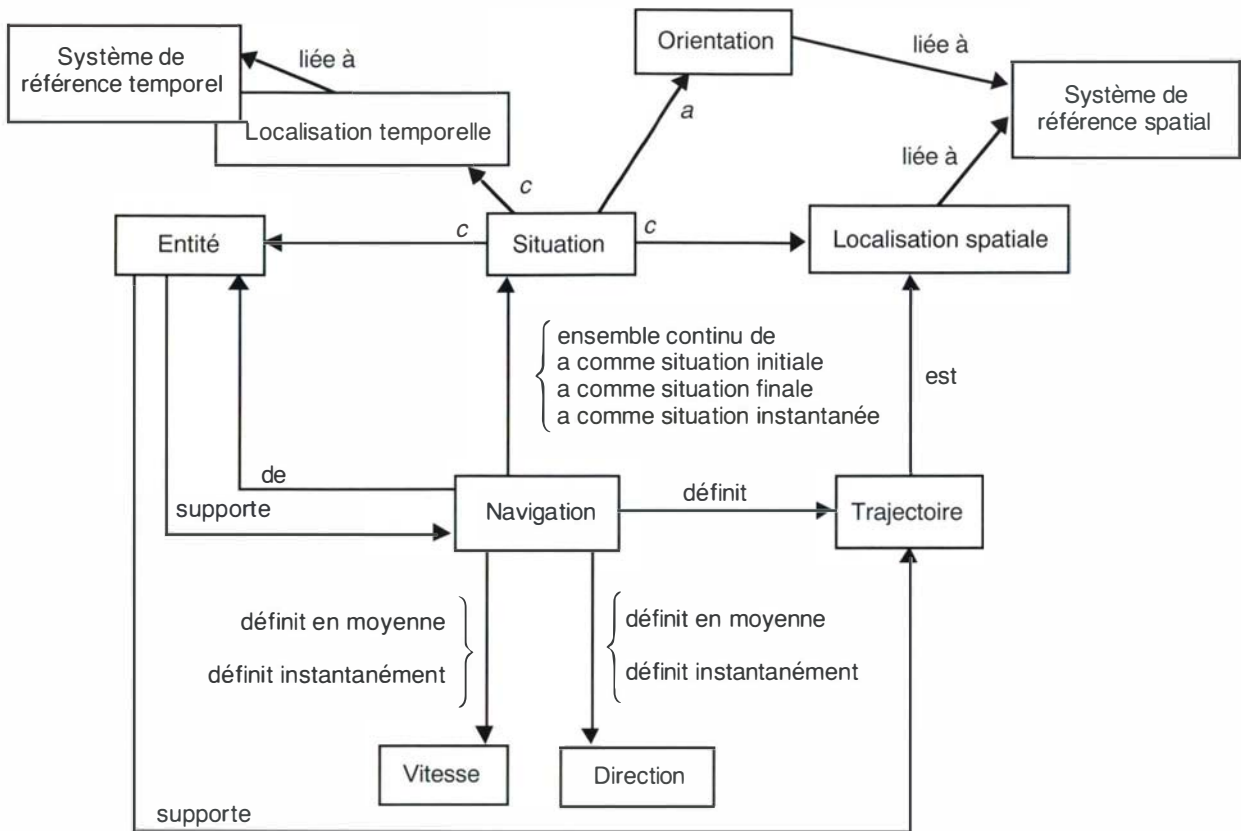


figure B.7.4

Ébauche du modèle de rôles. Les liens étiquetés "c" indiquent une relation de composition : une situation est composée d'une entité géographique, d'une localisation spatiale et d'une localisation temporelle et elle a (éventuellement) une orientation.

Une *navigation* est un ensemble de situations d'une même entité, continu dans un certain système de référence temporel : le déplacement d'un phénomène météorologique, les pays visités successivement par un globe trotter. On peut associer à une navigation une situation initiale, finale ou instantanée selon le paramétrage de cet ensemble.

Il lui correspond un ensemble de localisations spatiales : la *trajectoire*, qui est elle-même une localisation spatiale. Une navigation est en fait un ensemble plus que continu, elle définit une *direction* (instantanée, moyenne...), et, de même une *vitesse*.

Une entité peut être support d'une trajectoire. Ce lien obéit à la règle suivante. Il faut posséder un système de référence, un ensemble d'entités et un mode de caractérisation dans le système de référence donné tels que : à toute telle caractérisation, on peut associer 1 ou 0 entité de l'ensemble.

On considère, en d'autres termes, que cet ensemble d'entités est un système de référence particulier. L'entité est support de la trajectoire si elle est associée à cette dernière, vue en tant que caractérisation dans le système de référence.

Ce lien nous amène à en définir un autre : une entité peut être support d'une navigation. Ce lien permet de distinguer l'agent naviguant du mode de navigation. Par exemple, lorsqu'une personne se rend d'un pays dans un autre, ce déplacement est considéré comme une navigation. Or elle peut emprunter plusieurs moyens de transport au cours de cette même navigation : le métro puis l'avion puis une voiture.

Ces moyens de transport sont les supports de la navigation, à chaque tel support de la navigation est associé un domaine de supports possibles de trajectoire. Lorsqu'on le pourra, on confondra l'entité navigante et l'entité support de la trajectoire, par exemple dans le cas d'une personne se déplaçant uniquement en véhicule.

Des opérateurs correspondants sont de construire une situation ou une navigation, de mesurer une navigation. Ces opérateurs tiennent compte de certaines règles. Par exemple, lorsqu'on construit une situation on ne peut associer n'importe quelle localisation et n'importe quelle entité. Si une localisation consiste en deux villes connues, une maladie pourra y être située à un moment donné, mais une voiture ne pourra pas.

Par ailleurs lorsqu'on construit une navigation il faut souvent obligatoirement posséder un support de la trajectoire, par exemple lorsque l'entité géographique supportant la navigation est une voiture.

Des notions importantes ne figurent pas dans le modèle de rôles comme la gestion d'un historique et la notion d'identifiant - quand un objet cesse-t-il d'être lui-même pour devenir un autre ? -, la notion d'équivalence et d'agrégation de situations et de localisations, la notion d'accès d'une situation à un trajectoire, nous devons explorer de nouveaux scénarios et contacter des utilisateurs pour les étudier.

## Un exemple de tâche : le calcul d'itinéraire

Nous avons présenté une architecture théorique. Pour rendre cette présentation plus concrète, et stimuler l'intuition, nous allons développer très brièvement le fonctionnement du système dans le cas du calcul d'itinéraire. Il est important de comprendre le rôle joué par les différents éléments présentés précédemment. Mais on ne peut pas présenter de résultats précis et détaillés, ce serait anticiper sur les travaux à venir.

### Le calcul d'itinéraire

Pour des utilisateurs, le calcul d'itinéraire recouvre plusieurs types de problèmes différents comme, par exemple, un problème de ramassage, un automobiliste se rendant de Paris à Marseille, une personne ayant plusieurs activités à accomplir dans Paris en une journée et se déplaçant à pied et en transports en commun, un touriste souhaitant voir un maximum de choses dans un pays en une semaine, une personne qui cherche une destination pour partir en week-end en train avec un trajet d'une durée inférieure à trois heures.

Dans le système, le " calcul d'itinéraire " est la tâche générale de conception d'un itinéraire tel que le voit le système, c'est-à-dire construit à partir d'éléments du modèle de rôles. Ces éléments sont : une ou plusieurs navigations, et des situations correspondant aux dessertes.

Les déterminations de ces éléments sont liées les unes aux autres à cause des relations du modèle de rôles et également par des règles que nous devons implémenter au niveau des opérateurs et des stratégies. Tous les cas particuliers cités précédemment peuvent être représentés dans le système comme des instances de cette tâche générale.

Une tâche de conception se décline différemment en fonction des données déterminées initialement, des paramètres permettant de construire un espace de recherche de solutions, et des critères éventuels d'optimisation permettant de choisir une solution dans cet espace.

En règle générale, dans le cas de la conception d'un itinéraire, il faut se doter d'un ensemble de navigations possibles en exprimant les données initiales et en faisant varier des paramètres, puis choisir une navigation optimale dans cet ensemble grâce aux critères voulus. La stratégie de la tâche " calcul d'itinéraire " doit inviter l'utilisateur à donner le contexte d'invocation de cette tâche de conception pour savoir quelle méthode utiliser pour réaliser cette tâche dans son cas particulier.

### Le cas particulier du ramassage scolaire vu par le système

Dans le cas du ramassage scolaire, la détermination de la navigation d'un bus ou d'un piéton passe par l'identification de supports admissibles de trajectoires. Les supports admissibles de trajectoire d'un bus sont les tronçons du réseau routier, les contraintes sont les localisations des dessertes qui conduisent à considérer une portion du réseau routier dans une certaine région - probablement l'arbre couvrant maximum si on peut l'obtenir -, les critères d'optimisation sont les temps de parcours.

La caractérisation de situations nécessite d'identifier des localisations, c'est-à-dire un système de référence et une caractérisation, et de les associer aux entités. Ces localisations doivent être telles qu'on puisse savoir si elles appartiennent aux trajectoires citées précédemment, c'est-à-dire ici aux localisations des tronçons routiers.

### Le fonctionnement du système

Le concept générique *itinéraire* recouvre plusieurs définitions : celles des utilisateurs et celle du système. L'ontologie de tâches doit mettre en relation les définitions d'utilisateurs et celle du système.

La stratégie de cette tâche doit donc respecter deux typologies :

- la typologie des problèmes de calcul d'itinéraire d'utilisateurs, c'est-à-dire des profils utilisateurs spécifiques à ce type d'application,
- la typologie des problèmes de conception d'un itinéraire par le système, soit encore les cas possibles de répartition des éléments participant à cette construction entre les conditions initiales du problème, les paramètres variables, et les critères d'optimisation.

## Conclusions et suites en cours

Notre système doit en définitive interpréter une recherche de connaissances en une recherche de données géographiques, et en cela améliorer l'accessibilité des données géographiques aux utilisateurs.

Un travail d'Acquisition des Connaissances auprès des utilisateurs est nécessaire pour construire les tâches et le modèle de rôles. Par exemple, comme il n'existe pas de typologie des applications de calcul d'itinéraire, nous devons en construire une. Cette construction va s'appuyer en pratique sur la deuxième typologie présentée en exemple. En effet ce mode de catégorisation du calcul d'itinéraire par le système nous permettra d'élaborer une grille d'entretien, et cette grille sera utilisée lors d'interviews d'utilisateurs. Nous utiliserons une méthode faisant référence dans ce domaine, mise en place par le projet européen CommonKADS.

Nous avons choisi de nous concentrer sur le domaine routier et de contacter des utilisateurs appartenant à différentes classes d'applications : les pompiers, le bruit, le temps réel.

L'implémentation d'un prototype évolutif, à l'issue de premières rencontres avec des utilisateurs, facilitera par la suite l'Acquisition des Connaissances.

## Références

- [BISHR 97] Yaser Bishr : *Semantic aspects of interoperable GIS*, Ph.D. Dissertation, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 1997.
- [BORGIO et al 97] Stefano Borgo, Nicolas Guarino, Claudio Masolo & Guido Vetere : *Using a Large Linguistic Ontology for Internet-Based Retrieval of Object-Oriented Components*, Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering SEKE'97, 1997.
- [CHANDRASEKARAN et al 98] B. Chandrasekaran, J.R. Josephson & V. Richard Benjamins : *The Ontology of Tasks and Methods, Knowledge Acquisition*, Workshop KAW'98, 1998.
- [DGXIII 99] *Green Paper on Public Sector Information in Information Society*, European Commission, DGXIII, Info2000 Communication, 1999.
- [EGENHOFER 95] Max Egenhofer : *Naive Geography*, Conference on Spatial Information Theory, COSIT'95, 1995.
- [GOODCHILD 95] Mike Goodchild : *Report on a Workshop on Metadata held in Santa Barbara*, University of California, November 1995.
- [GRUBER 93] Thomas Gruber : *Towards Principles for the Design of Ontologies used for Knowledge Sharing*, Technical report, Stanford KSL-93-04, 1993.
- [KUHN 96] Werner Kuhn : *Semantics of Geographic Information*, GeoInfo, 1996.
- [LATAILLADE 97] Philippe Lataillade : *Les métadonnées géographiques, étude d'un système de catalogue des données géographiques pour la défense*, rapport d'étude, 1997
- [LE ROUX 94] Bernard Le Roux : *Eléments d'une approche constructive de la modélisation et de la réutilisation en acquisition des connaissances*, thèse de Doctorat de l'Université de Paris-4, 1994.
- [MARK et al 97] David Mark, Max Egenhofer & Kathleen Hornsby : *Formal Models of Commonsense Geographic Worlds*, NCGIA, technical report 97-2, 1997.
- [OGC 98] Open GIS Consortium Technical Committee : *The OpenGIS ® Guide Introduction to Interoperable Geoprocessing and the OpenGIS Specification*, édité par Kurt Buehler et Lance McKee, June 3, 1998.
- [SCHREIBER et al 93] A. Th. Schreiber, B.J. Wielinga, & J.A. Breuker, editors. *KADS : A Principled Approach to Knowledge-Based System Development*, volume 11 of Knowledge-Based Systems Book Series. Academic Press, London, 1993.
- [SMITH, MARK 98] Barry Smith & David Mark : *Ontology and Geographic Kinds*, International Symposium on Spatial Data Handling SDH'98, 1998.
- [WEIBEL et al 95] Stuart Weibel, Jean Godby, Eric Miller & Ron Daniel : *OCLC/NCSA Metadata Workshop Report*, 1995.

## B.8 Sensibilité des applications géographiques aux incertitudes : lien avec le contrôle qualité

Olivier Bonin

### Contexte - objectifs

La qualité des Bases de Données Géographiques (BDG) est une question aux implications non seulement techniques, mais aussi politiques et commerciales. En effet, les bases de données géographiques ou plus généralement les bases de données localisées sont au cœur de nombreux systèmes de décision. Elles sont utilisées dès que la problématique à résoudre fait intervenir des données localisées. Nous pouvons citer le Géomarketing, la gestion des ressources naturelles, la gestion des risques naturels, celle d'une flotte de taxis ou de camions, etc.

Les problèmes de qualité (on parle souvent de " non-qualité ") d'une base de données peuvent avoir des conséquences économiques et politiques. Les conséquences économiques sont évidentes si une base de données conduit à implanter un supermarché à un endroit qui n'est pas optimal, par exemple. De même la non-qualité d'une base de données peut anéantir des hectares de forêts si elle empêche de déterminer le bon itinéraire dans un système de guidage de véhicules de pompiers.

L'essentiel est avant tout de savoir mesurer la qualité, et de connaître ses répercussions sur des applications géographiques. La qualité des bases de données géographiques est donc étudiée de façon rigoureuse, et a suscité des travaux de la part de l'ISO (International Standardisation Organisation) et du CEN (Comité Européen de Normalisation), en relation avec ceux à l'IGN du PQBD (Projet Qualité des Bases de Données) [DAVID, FASQUEL 97]. L'approche retenue à l'IGN, conforme à celle du CEN, consiste à séparer la qualité en deux grandes composantes, la *qualité interne* et la *qualité externe*.

La qualité interne mesure l'adéquation de la base à ses spécifications (sa bonne réalisation en quelque sorte), et la qualité externe mesure l'adéquation des spécifications aux besoins des utilisateurs. Si la première est assez facile à évaluer, la deuxième est beaucoup plus difficile à appréhender. Le laboratoire COGIT a entrepris une action de recherche sur la qualité des bases de données géographiques. Elle a suscité une thèse sur la modélisation des incertitudes géométriques des objets linéaires [VAUGLIN 97] et se poursuit par une thèse sur la modélisation des incertitudes géométriques des objets surfaciques (A. Bel Hadj Ali) et une thèse sur les conséquences de la qualité pour un utilisateur (O. Bonin).

La qualité pour un utilisateur se pose souvent dans les termes suivants :

*" Les données que j'achète sont-elles suffisamment bonnes pour l'utilisation que je veux en faire ? "*

Il faut préciser cette question et la reformuler pour espérer pouvoir y répondre. En particulier, il est légitime de se demander, si au vu des indicateurs de qualité fournis par le producteur de données, on peut prévoir la qualité des résultats d'une application géographique.

Nous avons introduit jusqu'ici deux notions qu'il est bon de préciser. Le terme d'*indicateur de qualité* désigne un paramètre défini par le producteur pour qualifier (souvent de façon quantitative) un des aspects de la qualité de ses données. Citons en exemple une erreur moyenne quadratique (EMQ) sur la position des carrefours du réseau routier de la base de données. Le terme d'*application géographique* désigne l'utilisation que le client fait des bases de données géographiques. C'est, par exemple, un système embarqué d'aide à la navigation.

Les applications géographiques sont très différentes les unes des autres. Nous allons ici étudier le problème d'un utilisateur qui, pour une application géographique donnée, se pose la question de l'incidence de la qualité d'une certaine base de données géographiques sur les résultats de son application. Nous ne prendrons en compte par la suite que la qualité interne, c'est-à-dire que nous supposerons que les spécifications de la base de données répondent parfaitement aux besoins de l'utilisateur.

Nous allons présenter, tout d'abord, comment construire des modèles statistiques d'incertitude en liaison avec le contrôle qualité. Nous poserons ensuite le problème de la qualité des résultats d'une application géographique. Nous étudierons enfin comment relier ce problème aux modèles d'incertitude et donc aux indicateurs de qualité.

### Contrôle qualité et indicateurs de qualité

Vu sa complexité, la qualité d'une base de données géographique est évaluée en composantes distinctes. On distingue à l'IGN les cinq composantes suivantes, sur lesquelles s'accordent la plupart des spécialistes des bases de données géographiques :

- la généalogie,
- l'actualité,
- la cohérence logique,
- la précision géométrique,
- la précision sémantique et l'exhaustivité.

Chacune de ces composantes est estimée par un certain nombre de paramètres qu'on appelle *indicateurs de qualité*. Ils tentent de décrire de la façon la plus complète possible la qualité de la base de données.

Ces indicateurs sont très différents les uns des autres. Certains sont purement descriptifs, d'autres sont fondés sur du dénombrement, et d'autres, enfin, sont estimés en fonction de modèles d'incertitudes. Les indicateurs descriptifs sont, par exemple, la mention du producteur des données, la date de saisie, de mise à jour, etc. Les indicateurs fondés sur du dénombrement sont typiquement ceux décrivant la cohérence logique et la précision sémantique. On compte le nombre d'erreurs de chaque type présentes dans la base de données (ou dans un échantillon de la base de données si le contrôle n'est pas exhaustif). Certains indicateurs enfin sont des estimateurs de modèles statistiques d'erreur (position de certains objets ponctuels décrits par des estimateurs d'une moyenne et d'un écart-type).

La nature différente des indicateurs est un obstacle important à leur bonne compréhension par l'utilisateur. Le nombre d'indicateurs de qualité est très élevé. Un utilisateur doit donc trouver une façon synthétique de les appréhender. Il ne s'intéresse, en particulier, qu'aux indicateurs qui pourront lui donner une indication de la qualité des résultats qu'il obtiendra en utilisant la base de données. Il va devoir *sélectionner* ceux qui lui paraissent les plus importants et les *agréger*. Mais la nature différente des indicateurs empêche de les comparer pour les sélectionner, et de les agréger directement. Un travail préalable est nécessaire, celui de la création de modèles statistiques d'incertitudes.

## Modèles statistiques d'incertitude et lien avec le contrôle qualité

Nous avons vu qu'il est indispensable pour cette étude de définir des modèles d'incertitude globaux ou agrégés. Pour ce faire, il faut tout d'abord créer de nouveaux modèles adaptés au problème lorsqu'ils n'en existent pas. C'est le cas, par exemple, de la qualité sémantique. Nous avons construit des modèles d'incertitude pour chaque classe et chaque attribut dont les paramètres sont liés aux matrices de confusion fournies par le contrôle qualité, en s'attachant à rendre ces modèles synthétiques, c'est-à-dire en ne gardant que le minimum de paramètres. Le nombre exact de paramètres laissé libre dans le modèle a été déterminé par des tests sur des contrôles qualité existants.

Nous avons ensuite agrégé les modèles d'incertitudes existants (modèle d'incertitudes géométriques, par exemple) et les nouveaux modèles que nous avons proposés. Nous pouvons facilement les combiner en fonction de besoins pour prendre en compte des incertitudes de type différent, car nous ne travaillons plus qu'avec des modèles statistiques d'incertitude, dont les paramètres sont estimés à l'aide des indicateurs de qualité.

## Qualité des résultats d'une application géographique

Un élément important pour l'utilisateur est de savoir préciser son besoin en termes de qualité du résultat de son application. L'utilisateur va devoir préciser ses exigences à l'aide de trois paramètres. Le premier est le critère  $C$  permettant de mesurer la qualité du résultat de son application géographique. Le deuxième est la valeur maximale admissible  $\eta$  du critère  $C$  en temps normal. Le dernier est la probabilité admissible  $\varepsilon$  de dépassement de la valeur admissible  $\eta$  du critère  $C$ . Ces trois paramètres étant définis, il sera possible de déterminer si la base de données est conforme aux exigences de l'utilisateur ou non.

Prenons l'exemple d'une application de calcul d'itinéraires. L'utilisateur indique un point de départ et un point d'arrivée, et l'application lui donne le trajet le plus rapide en temps, et le temps de parcours associé à ce trajet. Un exemple de contraintes sur le résultat de l'application peut être "obtenir un écart relatif en temps de parcours inférieur à 10% dans 95% des cas".

Le temps de parcours est calculé dans l'application géographique à l'aide d'un modèle de déplacement que nous ne remettons pas en cause pour cette étude. Notons au passage que le temps de parcours "réel" n'est pas accessible, et qu'on utilise comme temps de référence le temps calculé dans la base de données de référence. Cette contrainte se traduit de la façon suivante. Si on note  $T_{Ref}$  le temps de parcours calculé dans la référence (base de donnée parfaitement conforme à ses spécifications), et  $T_{BD}$ , le temps de parcours calculé dans la base de donnée (dont l'utilisateur dispose), on constate que :  $T_{Ref}$

$$C = \left| \frac{T_{Ref} - T_{BD}}{T_{Ref}} \right|, \eta = 0,1 \text{ et } \varepsilon = 1 - 0,95 = 0,05 \text{ et la contrainte devient :}$$
$$P \left( \left| \frac{T_{Ref} - T_{BD}}{T_{Ref}} \right| > 0,1 \right) < 0,05 \text{ pour tous les parcours calculés.}$$

Nous venons de formuler un problème de test statistique. On vérifiera si cette contrainte est ou non vérifiée par la base de données, c'est-à-dire si on refuse ou accepte l'hypothèse du test.

Les résultats d'une application géographique étant de natures très diverses, les critères sur la qualité des résultats de l'application prendront des expressions très différentes selon les applications et les besoins de l'utilisateur. Nous en avons donné un exemple. Continuons à étudier cette application de calcul d'itinéraires. La contrainte imposée ici est une contrainte relative sur les temps de parcours. Nous aurions pu imposer une contrainte absolue (l'erreur sur le temps de parcours ne doit pas dépasser dix minutes). Nous aurions pu aussi nous intéresser à l'itinéraire proprement dit (distance, localisation, etc.) ou à des critères composites mélangeant plusieurs exigences. Préciser les exigences en

terme de qualité des résultats de l'application géographique est une tâche importante et complexe, que l'utilisateur, expert dans son domaine, doit mener à bien.

## Résolution du problème

Pour résoudre le problème de test posé précédemment, il faut connaître la loi de la variable aléatoire  $C$ . Cette loi peut être calculée à partir des modèles statistiques d'incertitude qui ont été définis. Ce calcul, dont la complexité dépend de l'application géographique et du critère de qualité  $C$ , devient très vite d'une difficulté extrême. Il faut donc définir des stratégies d'étude pour mener à bien ce travail.

## Stratégies d'étude

Nous allons présenter ici deux stratégies d'étude qui sont complémentaires.

L'une consiste à étudier mathématiquement la transformation des modèles d'incertitude par une application géographique dans des cas simples. Elle permet de déterminer de façon exacte la loi du critère  $C$  sur le résultat de l'application géographique, et donc sa relation avec les indicateurs de qualité de la base de données. Le problème de test que nous avons posé plus haut peut donc être résolu.

L'autre consiste à se doter d'un outil de simulation et à réaliser une étude empirique suivie d'analyses statistiques. On cherchera à déterminer empiriquement le lien entre le critère  $C$  et les indicateurs de qualité, avant de répondre au problème de test.

## Étude théorique

L'étude théorique présente des difficultés considérables. Un exemple simple se trouve dans [RAVEL 96]. L'application géographique est le calcul de la distance entre deux points  $A_1$  et  $A_2$  appartenant à deux objets linéaires, et les incertitudes prises en compte sont les incertitudes géométriques.

D'après [VAUGLIN 97], les coordonnées  $(X_i, Y_i)$  de chaque  $A_i$  suivent une loi GES (mélange de loi Gaussienne et de loi exponentielle symétrique, avec trois paramètres). Nous avons au total un modèle avec douze paramètres.

Nous devons déterminer la loi de  $Z = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}$ .

Le calcul théorique est faisable, mais les applications numériques demandent un temps considérable de calcul (de l'ordre de trente secondes sur un PC standard).

Un deuxième exemple est en cours de développement. L'application géographique considérée est une application de calcul de temps de parcours et d'itinéraires. Pour le moment nous nous restreignons aux erreurs de sémantique, et cette étude est menée sur des itinéraires déterminés à l'avance. Elle permet de valider les modèles statistiques d'incertitude sur la sémantique que nous avons préalablement définis.

## Simulation

La simulation de type Monte-Carlo permet de mener à bien complètement une étude expérimentale lorsque le calcul n'est pas possible. Elle doit être menée de façon rigoureuse. Un exemple d'une telle étude est détaillé dans [BONIN 98], qui reprend les outils développés par [COUGET 97]. Nous allons l'exposer brièvement ici.

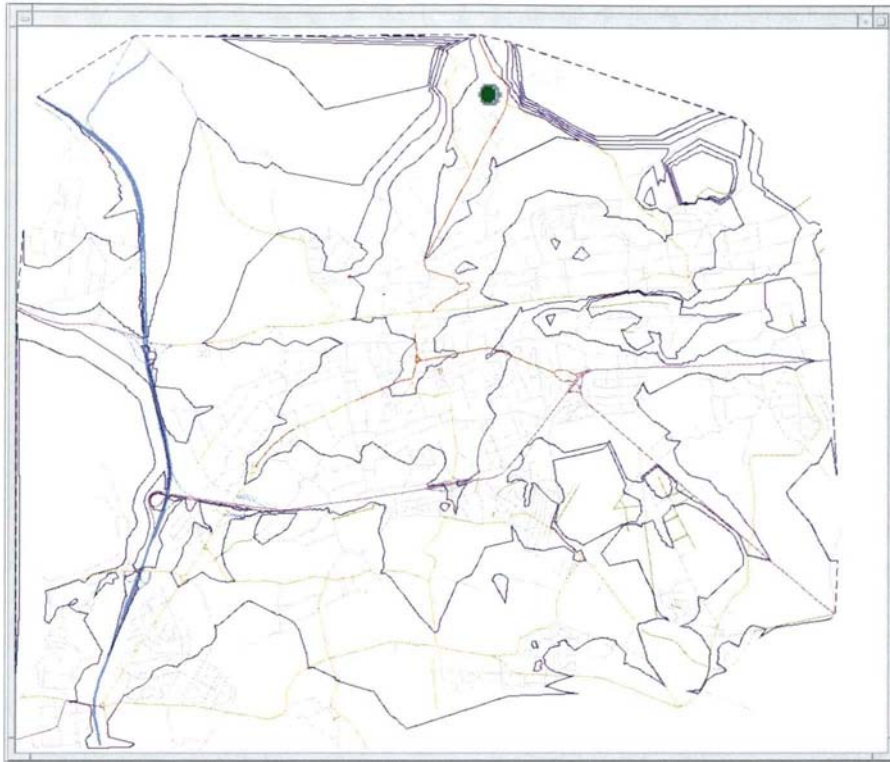
Pour faire une étude par simulation, il est nécessaire de se doter d'un certain nombre d'outils :

- un outil de bruitage contrôlé de la base de données,
- l'application géographique elle-même,
- un outil de calcul du critère  $C$  (comparaison des résultats),
- un outil d'analyse statistique et d'analyse de données.

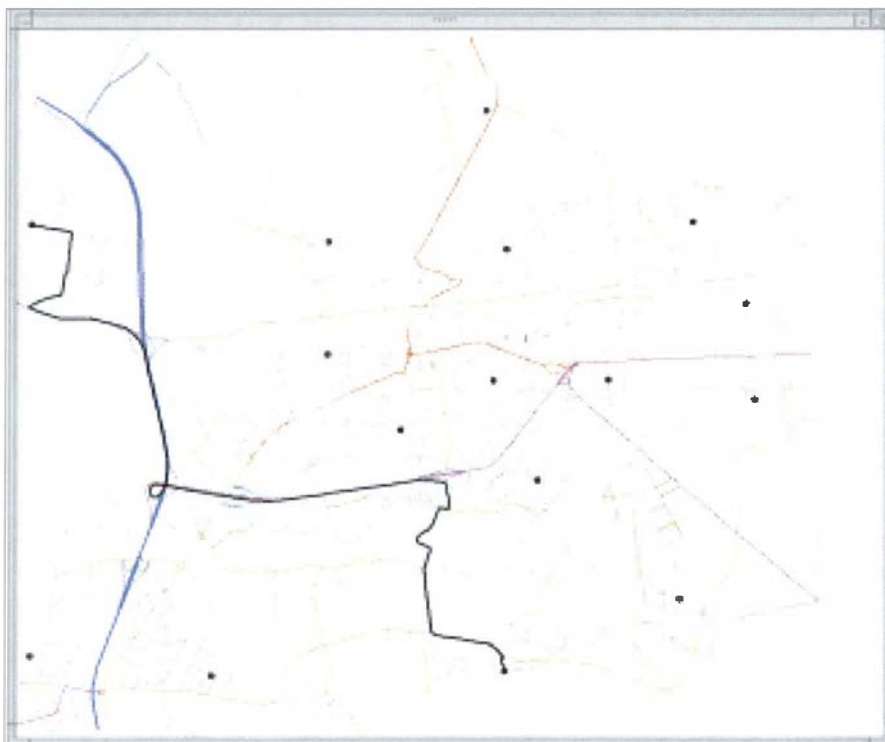
Pour obtenir une base de données d'une qualité déterminée (c'est-à-dire dont le contrôle qualité donne les valeurs souhaitées), on utilise une simulation de type Monte-Carlo. Cette technique consiste à bruitez chaque objet de la base de données selon un modèle d'incertitude.

Ce modèle d'incertitude dépend de paramètres fixés en fonction des taux d'incertitude globaux que l'on souhaite obtenir. Puisqu'il y a un très grand nombre d'objets, on obtient une base de données de qualité souhaitée.

Dans cette étude, nous étudions une application de calculs d'itinéraires et d'isochrones (points situés au même temps de parcours d'un point initial fixé). La base de données utilisée est Géoroute sur la zone de Lagny (F). Les résultats se présentent de la manière suivante :



**figure B.8.1** : isochrones sur Lagny (en bleu) par rapport au point vert



**figure B.8.2** : exemple de plus court chemin (en noir) ;  
les points de départs et d'arrivées possibles sont matérialisés par des points noirs

Pour l'étude par simulation, nous considérons que cette base de données est sans erreur, et elle devient notre référence.

Nous choisissons de nous intéresser à un bruitage des attributs uniquement (précision sémantique). Nous générons à l'aide de l'outil de bruitage un certain nombre de jeux de données de qualité de plus en plus dégradée. Nous calculons ensuite les résultats de l'application géographique en utilisant les jeux de données bruités.

Nous calculons pour chaque jeu de données bruité la valeur du critère  $C$  en comparant le résultat obtenu au résultat de référence (obtenu avec la base initiale).



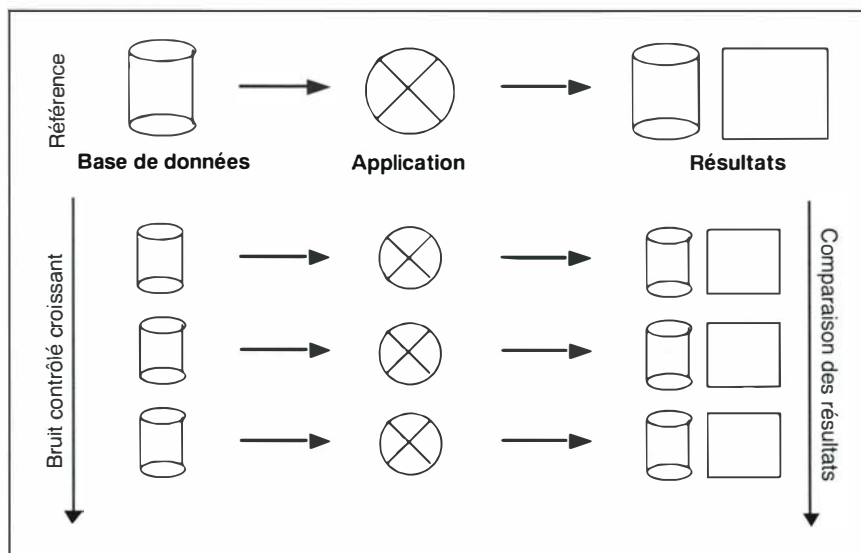


figure B.8.3 : principe de l'analyse par simulation

Nous essayons ensuite de mettre en évidence une relation entre l'importance du bruit présent dans la base de données et la qualité des résultats de l'application géographique, exprimée par le critère  $C$ . On trouve souvent dans la littérature le terme d'*analyse de sensibilité géographique* quand cette étude est menée sur des données maillées (*raster*) [LODWICK et al 90], par exemple.

Le critère  $C$  que nous avons choisi pour qualifier les résultats de l'application est la moyenne des écarts entre les aires des isochrones calculées dans le jeu de données et les aires des isochrones calculées dans la référence. Il reste donc à relier les variations de ce critère aux variations des indicateurs de qualité décrivant la qualité du jeu de données utilisée.

Nous avons choisi ici arbitrairement un critère. Dans le cas d'une étude réelle, c'est l'utilisateur, expert dans son domaine, qui doit fixer le critère qui répond le mieux à ses exigences. Nous pouvons tout de même signaler que l'utilisation d'autres critères (nombre de tronçons de route communs aux trajets du jeu de données et de la référence par exemple) ont donné sensiblement les mêmes résultats.

Nous avons, par des techniques de régression, déterminé l'indicateur de qualité dominant pour cette application et ce jeu de données. C'est le taux d'accord de la valeur la plus représentée de l'attribut *Vocation du tronçon routier*, "Voie de desserte", qui a un rôle prédominant dans notre calcul d'isochrones.

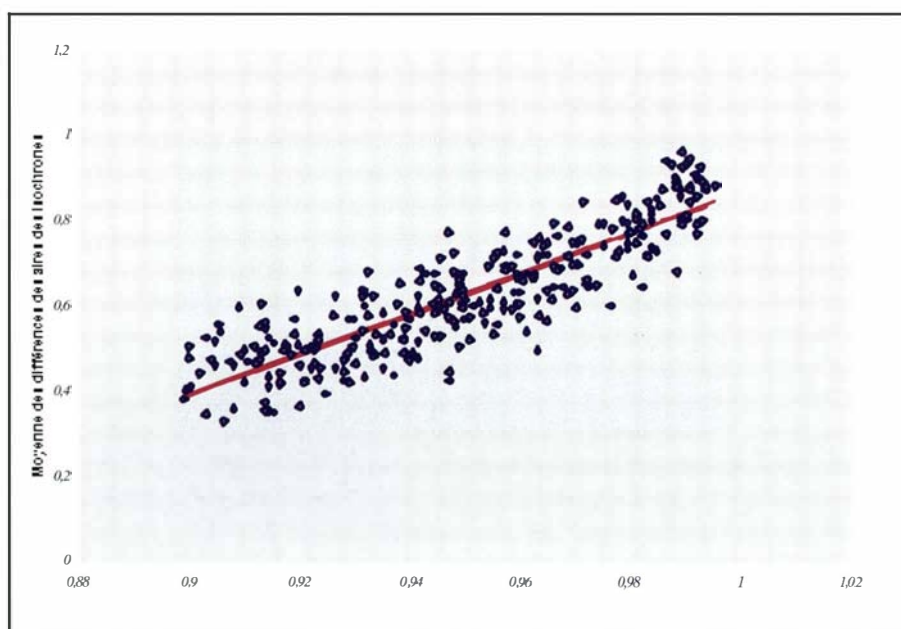


figure B.8.4 : régression entre le critère  $C$  et les indicateurs de qualité

Dans cette étude particulière, l'ajout d'autres indicateurs de qualité dans le modèle de régression ne permet pas d'améliorer sensiblement les résultats. C'est l'indicateur de qualité, cité plus haut, qui détermine majoritairement la qualité des résultats de l'application, les autres ayant une influence nettement moins grande.

Nous pouvons donc prédire la qualité des résultats de notre application géographique à l'aide des indicateurs fournis par le contrôle qualité. Remarquons, qu'ici, nous utilisons tel quel un des indicateurs du contrôle qualité. Cependant l'étude d'une autre application ou d'un autre jeu de données aurait très bien pu conduire à utiliser des paramètres d'un modèle statistique d'incertitude calculés à l'aide de plusieurs indicateurs de qualité.

## Conclusion et suite

L'étude de la sensibilité des applications géographiques aux incertitudes présentes dans la base de données est extrêmement dépendante de l'application elle-même. La méthodologie cependant nous semble intéressante car suffisamment générale et relativement simple à mettre en œuvre.

Le travail restant s'organise autour de deux axes. Le premier est la continuation d'études théoriques de propagations d'incertitudes dans des applications simples. En effet, l'étude théorique permet de valider de façon satisfaisante les modèles agrégés d'incertitude que nous avons définis pour la sémantique, en particulier quand les taux d'erreur sont très faibles. Le deuxième axe est la mise en place de simulation d'erreurs réalistes dans une base de données géographique conformément à tous les modèles d'incertitude existants (géométrie et sémantique, y compris les corrélations). Cette étape permettra une deuxième validation des modèles agrégés, ainsi que des études empiriques plus fidèles à la réalité.

## Références

- [COUGET 97] Pierre Couget : *Étude d'un outil de bruitage de la qualité de données géographiques*, rapport de stage de DESS AIST, Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 970042/S-STA, 1997.
- [DAVID, FASQUEL 97] Benoît David & Pascal Fasquel : *Qualité d'une base de données géographiques : concepts et terminologie*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 67, 1997.
- [LODWICK et al 90] W.A. Lodwick, W. Monson & L. Svoboda : *Attribute error and sensitivity analysis of map operations in GIS : suitability analysis*, Int. J. of GIS, 4, n° 4, pp. 413-428, 1990.
- [RAVEL 96] Benoît Ravel : *Modélisation des imprécisions géométriques dans les bases de données géographiques*, rapport de stage de deuxième année ENSAE, laboratoire COGIT, IGN-SR 960034/S-STA, 1996.
- [VAUGLIN 97] François Vauglin : *Modèles statistiques des imprécisions géométriques des objets géographiques linéaires*, thèse de doctorat de l'université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 970025/S-THE, 1997.

## Publication

- [BONIN 98] Olivier Bonin : *Attribute Uncertainty Propagation in Vector GIS : Sensitivity Analysis*, IEEE / Computer Society, Maiurizio Rafanelli and Mathias Jarke editors, pp. 254-259, laboratoire COGIT, IGN-SR 980026/S-COM, 1998.

# C. Bilan des actions de recherche

## C.1 Image et photogrammétrie

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

### C.1.1 Lecture automatique de cartes scannées

*Marc Pierrot Deseilligny*

#### Contexte

Une des difficultés majeures en analyse de photographies aériennes est le manque de compréhension globale de la scène. Or, ce modèle global existe sur les cartes ou plans qui, en raison de la normalisation des légendes se prêtent mieux à une compréhension automatique. L'étude porte donc sur l'extraction automatique d'objets topographiques sur cartes ou plans pour guider ensuite des extractions (ou recalage) des mêmes objets dans les images.

Une part importante de l'étude porte sur la lecture automatique de cartes scannées IGN à partir des planches-mères. Elle a démarré en octobre 1994.

#### Objectifs

Cette étude se situe dans le cadre de la saisie initiale de la base de données topographiques BD Topo. Les objectifs en production sont :

- d'une part, de fournir un modèle global de la scène permettant de guider les algorithmes d'interprétation sur photographies aériennes,
- d'autre part, de constituer, avec des coûts opérateur très faibles, des bases de données sur les zones qui ne seront couvertes qu'en fin de programmation BD Topo.

L'apparition du projet BD Topo/zone rurale (BDT/ZR) a conduit à rendre prépondérant le deuxième objectif. Ces deux objectifs ne sont cependant pas incompatibles et, par exemple, dans le cadre du projet BDT/ZR, les routes extraites de la carte pourraient être d'abord recalées sur ortho-photos (action de recherche "Extraction automatique des routes dans les images aériennes" avant d'être insérées dans la base.

#### Suites et travaux réalisés

Le principal travail de l'année a été réalisé dans le cadre du projet BDT/ZR. Entre octobre 1997 et avril 1998, différents tests et modifications ont été réalisés à l'occasion de l'étude préalable de Pierre-Yves Lecordix

D'avril à octobre 1998, l'équipe a assisté le projet BDT/ZR de Patrick Marmonier, chargé de réaliser une maquette complète sur la zone d'Altkrich. Au cours de ces différents essais, en plus d'améliorations aux algorithmes existants, on a abordé l'extraction de la plupart des thèmes non encore traités : chemins et réseaux linéaires, détails topographiques (serres, églises, stades), réseaux ferrés.

Les actions futures envisagées sont essentiellement une adaptation des algorithmes aux cartes de type 22. Pour le type 72, on se limitera à certaines améliorations ponctuelles apparaissant nécessaires aux équipes utilisant les résultats de cette action de recherche (équipe BDT/ZR ou action de recherche "Extraction automatique des routes dans les images").

tableau C.I.I.1 : principaux taux de reconnaissance et temps de correction pour une carte au 1 : 25 000

Thèmes	Taux de reconnaissance	Temps de correction
Toponymie	97%	2h
Autres écritures	99%	1h
Réseau routier	95%	11h
Bâti	75%	30 h

De manière plus ponctuelle, l'équipe a réalisé les travaux suivants sur demande de différents services :

- plusieurs essais de croisement entre les écritures reconnues sur la carte et la BDNyme ont été réalisés avec le double but de valider la lecture de la carte et de corriger/compléter automatiquement la BDNyme. Ces essais sont encourageants et devraient se prolonger l'année prochaine,
- nous avons assisté la Direction Générale des Impôts pour la spécification d'une chaîne de numérisation (scannage) de l'ensemble du plan cadastral,
- une chaîne d'extraction de texture sur planche de bleu a été réalisée pour la réfection des Top250 et Top100, elle est en cours d'évaluation au Service de la Cartographie Dérivée et Thématique (SDT),
- nous avons servi de conseil pour l'évaluation de produits commerciaux de "tatouage" électronique de documents.

L'extraction du bâti sur plans cadastraux sera abordée en cours d'année 1999 afin, d'une part, de pouvoir guider une restitution 3-D à partir d'images stéréoscopiques à grande échelle (résolution 15 à 20 cm) et, d'autre part, de servir de première couche vers un système d'interprétation " complète " de plans cadastraux pour la constitution d'une BD Topo parcellaire.

Enfin, les travaux de François Dupont, en thèse depuis octobre 1996, ont porté sur les deux points principaux suivants :

- l'amélioration du processus d'interprétation automatique des courbes de niveau issues d'une carte papier. Cet aspect du projet reste encore au stade de la recherche, et devrait se prolonger l'année prochaine ; on étudiera notamment si, partant des courbes maîtresses déjà numérisées, on est capable d'extraire et de coter de manière totalement automatique le reste des courbes,
- la génération, pour les zones qui ne sont couvertes par la BDAIti qu'au 1 : 60 000 (MNT issu de photogrammétrie aérienne), d'un MNT au 1 : 25 000, à partir de l'analyse des courbes de niveau des cartes IGN série bleue. Les résultats obtenus ici sont très encourageants, et nous permettent d'envisager une mise en production rapide de nos programmes. La généralisation de cette méthode à d'autres contextes, comme, par exemple, l'interprétation guidée par un MNT SPOT des courbes de niveau issues d'une carte papier, est en cours.

La soutenance de cette thèse est prévue pour septembre 1999.

## Publications

[DESEILLIGNY et al 98] Marc Pierrot Deseilligny, Georges Stamon and Ching Y. Suen : *Veinerization : a new shape descriptor for flexible skeletonization*, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(5) : 505-521, May 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980018/C-COM, 1998.

[DESEILLIGNY et al 98] Marc Pierrot Deseilligny, Robert Mariani, Jacques Labiche and Rémy Mullot : *Topographic maps interpretation, some proposed strategies*, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1389, pages 175-193, Springer-Verlag 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980023/C-ART, 1998.

[DESEILLIGNY, LE MEN 98] Marc Pierrot Deseilligny et Hervé Le Men : *An algorithm for digital watermark on binary images, applicaton to map abd text images*, in 1998 Symposium on Image, Speech and Signal Processing and Robotics, Hong-Kong, in Proceedings, pages 247-252, September 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980002/C-COM, 1998.

[DUPONT et al 98a] François Dupont, Marc Pierrot Deseilligny et Michel Gondrand : *Reconstruction automatique des courbes des niveaux à partir de cartes scannées en couleur*, 11ème congrès RFIA, Clermond-Ferrand (F), in Proceedings pages 103-112, laboratoire MATIS, IGN-SR 980020/C-COM, 1998.

[DUPONT et al 98b] François Dupont, Marc Pierrot Deseilligny et Michel Gondrand : *Automatic Interpretation of contour lines by using external data*, fourth IEEE Workshop on Application of Computer Vision, Princeton (USA), octobre 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980021/C-COM, 1998.

[DUPONT et al 98c] François Dupont, Marc Pierrot Deseilligny et Michel Gondrand : *Automatic Interpretation of scanned maps : Reconstruction of Contour Lines*, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1389, pages 194-206, Springer-Verlag 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980022/C-ART, 1998.

[MARIANI et al 98] Robert Mariani, Marc Pierrot Deseilligny and Rémy Mullot : *Linear Texture Segmentation using elastic matching : application to geographic map understanding*, in Pattern Recognition, laboratoire MATIS, IGN-SR 980019/C-ART, 1998.

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

Patrick Julien et Gil Gonçalves

### Travaux effectués

Ce titre regroupe deux thèmes : les qualités requises en modélisation numérique du relief, et la modélisation mathématique du relief. Au moment où ce compte rendu est rédigé (octobre 1998), le deuxième thème n'a pas été abordé : le compte rendu ne traite donc que du premier thème.

L'étude des qualités d'une modélisation du relief est menée dans le cadre d'une thèse (Gil Gonçalves). Elle s'intéresse à une modélisation comportant un niveau de détail similaire à celui d'une carte au 1 : 25 000, et que nous appelons en raccourci " modélisation à moyenne échelle ".

Le travail de l'année a été centré sur ce que nous avons appelé antérieurement le " problème des courbes intercalaires ", et qui est le fait que lorsqu'on interpole (par " grille élastique " notamment) un maillage dans un système de courbes de niveau, les courbes intercalaires, tracées à partir du maillage, sont souvent plus raides que les courbes de départ et ne s'y imbriquent pas.

Une solution à ce problème a été apportée en imposant à la " grille élastique " de passer par les lignes de crêtes et de thalwegs ; dans notre cas, ces lignes sont obtenues de façon approchée (mais suffisante ici) par l'intermédiaire d'une triangulation construite sur les courbes de niveau, en exploitant le fait (pénalisant dans un autre contexte) que les crêtes et les thalwegs sont traversés par des triangles horizontaux.

Une autre solution à l'essai est d'imposer à la " grille élastique " les tangentes aux courbes de niveau (c'est-à-dire les directions de l'horizontale) ; on a vérifié que cette solution est efficace lorsque les tangentes sont exactes ; mais la difficulté encore non résolue est d'interpoler des tangentes exactes dans les courbes de niveau.

Enfin, pour reconnaître numériquement la bonne ou mauvaise imbrication des courbes intercalaires dans les courbes de départ, on a utilisé deux mesures : la longueur totale de courbes et la courbure moyenne ; on a observé sur des exemples que ces mesures peuvent mettre en évidence une discordance entre courbes de départ et courbes intercalaires, donc un artéfact du MNT.

### Modèles numériques d'élévation (MNE) de précision

Patrick Julien

### Travaux effectués

On a cherché en 1998 à introduire un commencement d'automatisation dans la méthode que nous avons baptisée antérieurement " corrélation contrainte par modèle 3-D " (Bulletin d'Information de l'IGN n° 65, Activité recherche 1995).

Rappelons que la méthode consiste à chercher le modèle géométrique 3-D d'un objet du terrain (une maison en l'occurrence) en utilisant comme critère de succès la ressemblance entre les deux ortho-images de l'objet et de son voisinage, redressées au moyen de ce modèle 3-D. En pratique on obtient le modèle 3-D par approximations successives, à partir d'un modèle approché, en retouchant chaque paramètre à tour de rôle dans le sens qui maximise la corrélation entre les ortho-images (méthode de " relaxation ").

On ne s'occupe pour le moment que de maisons isolées, et du modèle le plus simple : maison rectangulaire avec toit à deux pans symétriques (" maison de monopoly ") ; ce modèle est donc décrit par huit paramètres :  $x$ ,  $y$  du centre maison,  $z$  du pied maison, longueur  $l$ , largeur  $k$ , hauteur gouttière  $h$ , angle d'orientation  $a$ , hauteur de la toiture  $t$ .

Dans nos essais d'automatisation, les valeurs approchées des paramètres sont obtenues comme suit : par pointé sur l'écran, on encadre le toit sur chaque image du couple par un rectangle à bords parallèles aux lignes et colonnes ; cela donne immédiatement  $x$ ,  $y$ ,  $z + h$  approchés et ramène la recherche du triplet  $(l, k, a)$  à un problème à un paramètre ;  $z$  et  $t$  approchés sont alors trouvés par tâtonnement. La détermination du modèle précis définitif est, elle, entièrement automatique.

Les essais ont été réalisés essentiellement sur un couple de photographies au 1 : 30 000 de la région d'Agen (F), numérisées à la résolution-sol 0,75 m, globalement avec succès ; l'examen visuel montre en général un accord satisfaisant des maisons restituées avec les photographies ; on a observé un cas où, partant d'un modèle approché mal proportionné ( $l/k = 3,5/1$  au lieu de  $1,6/1$ ) et désorienté (d'environ 15 degrés), la méthode était capable de retrouver un modèle correct ; on a aussi observé un cas où la méthode réussit à restituer séparément les deux corps d'une maison " en T ".

À la date de la présente rédaction (octobre 1998), on entreprend de nouveaux essais consistant à prendre pour valeurs approchées des paramètres  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $l$ ,  $k$ , à celles données par la carte au 1 : 25 000 numérisée et la base de données altimétriques IGN.

## C.1.3 Restitution des bâtiments pour la cartographie à grande échelle

Olivier Dissard, Frank Fuchs et Laurent Guigues

### Modèles numériques d'élévations

Olivier Dissard

#### Contexte

L'axe de recherche se situe dans la continuité des recherches menées par Caroline Baillard et Olivier Dissard sur l'analyse 3-D de scènes urbaines (actions de recherche " Systèmes d'interprétation d'images aériennes ", " Détection de changement pour la BD Topo " et " Reconstruction du bâti pour la cartographie à grande échelles ".

Trois algorithmes ont été mis au point dans le cadre de ces recherches :

- mise en correspondance d'images aériennes stéréoscopiques urbaines en préservant la verticalité des façades et en respectant les occlusions,
- extraction des zones de sursol et fabrication d'un MNT urbain avec les zones corrélées étiquetées " sol ", séparation des zones de sursol adjacentes mais d'élévations différentes,
- caractérisation de chaque zone de sursol en bâti ou végétation, avec possibilité de redécoupage d'une zone en zones plus petites et monothématiques.

L'ensemble des résultats peut être vu comme un processus d'analyse global d'un couple d'images urbaines sous la forme d'une focalisation d'attention pour des étapes ultérieures de reconstruction d'objets 3-D à base de primitives et de modèles paramétriques et sous la forme de la fourniture d'une grille d'élévations traduisant l'aspect 3-D de la surface.

#### Objectif

Cet axe de recherche s'est volontairement limité aux aspects raster de l'analyse 3-D, laissant aux autres axes de l'action de recherche " Reconstruction du bâti pour la cartographie à grandes échelles ", le soin d'étudier localement l'utilisation de primitives. Nous fournissons aux autres axes de recherche (y compris l'action de recherche " Détection des changements pour la mise à jour de la BD Topo ") un ensemble de zones d'intérêt et une grille d'élévations 3-D fournissant un premier aspect volumétrique de l'objet.

Par ailleurs, il existe des applications directes à la production de MNS (Modèle Numérique de la Surface) : l'ortho-imagerie urbaine, la production de données pour la téléphonie mobile.

Dans cet optique, les principaux objectifs de cet axe de recherche sont :

- améliorer les MNS, soit par la mise au point de corrélateurs adaptés, soit par l'utilisation de prises de vues adaptées (multi-recouvrement, couleur), afin d'affiner la description du sursol et sa forme en 3-D,
- étudier l'utilisation des MNS issus de la corrélation pour la fabrication d'ortho-images urbaines ou d'autres données d'application.

#### Réalisations

L'année 1998 (septembre 1997-1998) a été marquée par deux événements majeurs :

- l'étude technique des besoins en téléphonie mobile, DGTEM, et la réalisation de jeux de données 3-D à l'aide des algorithmes du laboratoire MATIS (cette réalisation a nécessité des développements que nous détaillons par la suite),
- l'utilisation des images de la caméra numérique en multi-recouvrement sur la ville du Mans (F) et dont la mise en place a été effectuée dans le courant de l'année 1998.

#### Mise en correspondance d'images de grande taille

Bien que nous disposions d'un ordinateur performant, la mise en correspondance d'un couple d'images entières provenant du scannage de clichés argentiques (5 000 x 10 000 à 7 000 x 14 000) nécessite quelques aménagements.

- L'intervalle de recherche des points homologues n'est plus fixe, sinon il serait d'autant plus énorme que la région est vallonnée ou qu'elle possède des édifices très hauts. Dans un premier temps, nous avons opté pour un paramétrage semi-automatique : les disparités maximales sont automatiquement paramétrées à l'aide d'un MNT grossier (BDZ), les disparités minimales sont paramétrées manuellement par le dessin d'une carte grossière (une disparité minimale globale est fixée, puis les zones à édifices élevés sont cernées et affectées d'une disparité minimale propre). Un paramétrage fin de cet intervalle réduit le nombre d'erreurs de corrélation et accélère considérablement le temps de calcul.

- La mise en correspondance proprement dite se fait par blocs de lignes épipolaires, chaque intervalle pour la corrélation par programmation dynamique est géré dynamiquement sur l'image gauche et l'image droite en fonction des cartes min et max.
- Les autres étapes (détection et caractérisation du sursol) se font par blocs.
- La mise en correspondance d'un couple d'images (5 000 x 10 000) sur Paris nécessite cinq heures cpu, le reste des traitements en ayant nécessité une huitaine.

#### *Fabrication d'un jeu-test pour la téléphonie mobile*

L'étude technique des besoins pour la téléphonie mobile (DGTEM) a débouché sur des spécifications de données pour la planification cellulaire fine, qui sont approchables par les résultats du laboratoire MATIS. Nous avons donc fait un jeu-test de données sur une zone de 8 km<sup>2</sup> de Paris à la résolution de 40 cm, dégradable à 1,20 m, 4,80 m.... Les temps de calculs sont donnés au paragraphe précédent.

#### *Corrélation d'images de la caméra numérique en multi-recouvrement sur le centre-ville du Mans*

Les spécifications de la prise de vue de la caméra numérique sur Le Mans doivent nous permettre d'éviter un certain nombre de défauts des résultats de la mise en correspondance sur les zones urbaines. La très grande dynamique et la propreté des images nous permettent d'utiliser des fenêtres réduites de corrélation (3 x 3 ou 5 x 5), ce qui diminue fortement les délocalisations des discontinuités. Par ailleurs, les zones homogènes ne sont pratiquement plus problématiques.

Le multi-recouvrement diminue la surface des plages d'occlusion. En effet, presque chaque point est assuré d'être vu sur au moins deux points de vue. Il permet aussi de résoudre le problème des véhicules mobiles, dans la mesure où tous les couples où apparaît ce véhicule donnent une erreur de corrélation différente en fonction de la direction épipolaire. À la fin n'est sélectionné que le résultat des trois mises en correspondances cohérentes (où n'apparaît pas le véhicule). Seuls les problèmes d'inversion de contraste (apparition de façades sur deux des quatre points de vue) demeurent.

La fusion de toutes les corrélations possibles sur un bloc de quatre images d'une même scène a été l'objet du stage de Damien Mayer dont les résultats confirment nos espoirs et dont nous approfondirons le travail en 1999.

#### *Correction des données de corrélation sur les zones homogènes*

Pour l'algorithme de mise en correspondance d'images urbaines, développé dans le cadre de cette recherche, les zones homogènes posent de graves problèmes. En effet, il n'y est pas possible de comparer localement les radiométries entre images gauche et droite car les bruits radiométriques y sont plus importants que les variations locales de l'intensité. Seules de fortes contraintes de continuité sur la surface (ou l'utilisation de surfaces particulière) peuvent résoudre ce problème, ce qui s'oppose à la possibilité propre aux milieux urbains de décrochements et d'occlusions. Les zones homogènes en ressortent très bruitées.

L'idée de départ de cette recherche est d'une part, d'isoler ces zones de sursol, d'autre part, d'y rechercher la surface 3-D, soit en interprétant les résultats bruts de corrélation (sous l'hypothèse que le bruit est centré), soit en y utilisant un corrélateur possédant de forte contrainte de continuité (par exemple, le corrélateur par facette de Patrick Julien).

Cette année, le stage d'Hassan Jibrini a permis d'isoler correctement ces zones homogènes et a testé le calcul de surfaces polynomiales du premier au troisième degré par moindres carrés sur les résultats de corrélation. Les résultats ne sont pas probants, il faudra donc par la suite tester l'utilisation d'un corrélateur adapté.

#### **Publications**

[BAILLARD et al 98a] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Extraction and Textural Characterization of Above-ground Areas from Aerial Stereo Pairs : a Quality Assessment*, in ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 53, pp 130-141, laboratoire MATIS, IGN-SR 980024/C-ART, 1998.

[BAILLARD et al 98b] C. Baillard, O. Dissard & H. Maître : *Segmentation of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery*, in proceedings of the 14th Int. Conf. of Pattern Recognition (ICPR), 16-20 août 1998, Brisbane, Australia, pp. 1405-1407, laboratoire MATIS, IGN-SR 980025/C-COM, 1998.

[DISSARD, BAILLARD 98a] O. Dissard & C. Baillard : *Analyse automatique d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains*, in Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, n° 149, pp29-41, laboratoire MATIS, IGN-SR 980004/C-ART, 1998.

[JIBRINI 98] H. Jibrini : *Fabrication de modèle d'élévations dense en zone urbaine : correction des données sur les zones homogènes et les occlusions*, rapport de stage du DEA Informatique Fondamentale et Applications, Université de Marne-La-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 980012/C-STA, 1998.

[MAYER 98] D. Mayer : *Fusion de résultats de corrélation*, rapport de stage du DEA Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 980013/C-STA, 1998.

## Reconstruction du bâti pour la cartographie à grande échelle

Frank Fuchs

Les travaux concernant les Modèles Numériques d'Élévation (Olivier Dissard), bien qu'intégrés à cette action de recherche pour 1998 font l'objet d'un compte rendu spécifique, car ils présentent suffisamment d'intérêt en soi, notamment en termes applicatifs.

Cette partie se découpe en deux sous-parties : la première, concernant la reconstruction automatique du bâti proprement dite, et la seconde, traitant des travaux de Patrick Julien sur la corrélation par facettes.

### Contexte

Les travaux de cette étude se placent dans le contexte des besoins grandissants de données cartographiques urbaines à grande échelle.

L'étude se place en aval des travaux d'Olivier Dissard et Caroline Baillard concernant l'obtention de Modèles Numériques d'Élévations et la séparation sol-sursol à partir de couples stéréoscopiques à moyenne échelle.

La reconstruction du bâti est l'objet d'une thèse débutée fin de l'année 1997. L'échelle des images utilisées est décimétrique (taille caractéristique du pixel de 10 à 25 cm).

### Objectifs

Les travaux concernent la détection et la reconstruction automatique du bâti, incluant les formes et positions de gouttières, ainsi que les structures internes de toits (pans de toits). L'objectif de précision est décimétrique, en liaison avec l'échelle des images.

### Travaux effectués

L'approche des travaux est structurelle : on vise une extraction d'objets simples tridimensionnels de deux types : les portions de plans (pans de toits et façades), ainsi que les segments de droites (gouttières, faîtes, angles de bâtiments). Ensuite, on cherchera à agréger les objets simples extraits à l'aide de modèles, afin de reconstruire les objets recherchés complets.

Cette année a été principalement consacrée à la première partie du travail : l'extraction de primitives.

Des efforts ont donc été portés sur l'extraction des primitives planes. Un processus de croissance de régions a été développé. Il est destiné à segmenter les cartes de disparités issues des travaux sur les Modèles Numériques d'Élévation. La croissance de régions est pilotée par un critère utilisant le formalisme de longueur minimale de description (Minimum Description Length, MDL, en anglais). Le principe de la MDL réalise intrinsèquement le compromis entre la complexité de la segmentation et son adéquation aux données (plus elle est complexe, plus elle respecte les données, ce qui induit une faible erreur, mais un coût lié à la complexité elle-même, plus elle est grossière, plus il y a d'erreurs, mais un coût de complexité faible), ce qui fait de cette méthode une approche pertinente pour la cartographie (dans laquelle on cherche à caricaturer : représenter l'information pertinente dans un code minimum).

L'algorithme ne nécessite qu'un seul paramètre lié à la force de la segmentation (ou le nombre de régions souhaité), si bien que pour certaines valeurs, les toits des bâtiments sont mis en évidence, alors que pour d'autres, on obtient aisément les façades. En utilisant simultanément plusieurs valeurs du paramètre, une détection des pans de toits et des façades est possible, lorsque celles-ci sont vues. Cette technique a fait l'objet d'un rapport interne au laboratoire MATIS [FUCHS 98] et de soumission à congrès [FUCHS, LE MEN 98].

Par ailleurs, la construction de primitives linéaires a été entamée, en s'appuyant sensiblement sur des travaux de la littérature pour l'extraction de segments de droite dans les images. Ces segments sont ensuite plongés dans l'espace-objet au moyen de la carte des disparités.

Enfin, les premières tentatives de détection de modèles de bâtiments dans les lots de primitives obtenus sont menées actuellement : d'un côté, les primitives sont les nœuds d'un graphe attribué dont les arcs expriment les relations entre les primitives (intersection, parallélisme, etc), de l'autre, les modèles de bâtiments sont des graphes du même type exprimant les objets recherchés. Des techniques visant à rechercher les isomorphismes entre les graphes-modèles et les sous-graphes du graphe des primitives permettent de détecter des objets recherchés dans les lots de primitives.

### Suite des travaux

La suite des travaux visera à continuer l'étude des processus de détection de modèles de graphes dans les lots de primitives. Il sera notamment nécessaire de lutter contre la combinatoire de la problématique d'appariement entre les graphes décrivant les modèles et les graphes de primitives. Par contre, ces techniques sont susceptibles d'être tolérantes aux sous-détections (primitives absentes après la détection), ce qui présente un intérêt que nous évaluerons.

Enfin, afin de pouvoir décrire une grande variété de bâtiments, l'utilisation d'un processus grammatical est envisagée. Dans ce scénario, la détection de modèles dans les primitives sera chargée d'identifier des fragments de



bâtiment, alors que l'aspect grammatical se chargera d'assembler les fragments pour obtenir une description complète des objets.

## Publications

[FUCHS 98] F. Fuchs : *Croissance de régions par approximations planes. Application à la détection de primitives 3-D planes*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980026/C-RAP, février 1998.

[FUCHS, LE MEN 98] F. Fuchs & H. Le Men : *Detecting planar patches in urban scenes*, Workshop on Applications Computer Vision, WACV '98, laboratoire MATIS, IGN-SR 980027/C-COM, 1998.

## C.1.4 Détection de changement pour la BD Topo

*Franck Jung et Olivier Jamet*

### Axe comparaison image-image

*Franck Jung*

#### Contexte - objectifs

Cette étude a débuté en 1997. Dans ce cadre, une thèse de l'Ecole Polytechnique encadrée par Donald Geman (UMASS) a débuté en septembre 1997. Une approche thématique a été adoptée. L'étude s'est focalisée sur les objets constituant le sursol (bâti et végétation). Afin de comparer de façon fiable des primitives (éléments de contour, points d'intérêt, éléments de textures) provenant de deux dates différentes, une première étape consiste à reconnaître grossièrement l'objet auquel appartiennent ces primitives extraites (processus de focalisation).

Une première étude (grossière) concernant la détection de bâtiments a été réalisée. Cette étude a été basée sur une technique d'apprentissage en monoscopie utilisant des arbres de décision. Les taux de sous-détections et de sur-détections sont tous les deux voisins de 10%. Ces résultats laissent présager des améliorations du taux de reconnaissance en utilisant plusieurs images permettant ainsi de travailler dans l'espace objet.

#### Travaux réalisés

##### *Extraction de primitives 3-D*

Des extractions de primitives 3-D de type coins et droites avec estimation du taux d'erreur ont été réalisées. Leur intégration dans un processus de décision est en cours. Une partie de l'étude des primitives extraites ainsi que leur qualité a pu être abordée dans le cadre d'un stage ayant pour objectif la détection de points de liaison. [RAJAONARISON 98].

##### *Mise en place d'un processus de focalisation*

Un objectif important de 1998, conformément à ce qui avait été prévu, aura été la mise en place d'un processus de focalisation sur des changements éventuels. Différents critères ont été testés. Le critère permettant de limiter le nombre de sous-détections a été retenu. Ce critère est basé sur la notion d'élévation comme invariant temporel. Un critère basé sur la différence médiane d'élévations a été retenu. L'approche sera détaillée dans [JUNG 98]. Les premières évaluations nous donnent un taux de 7 à 8% de vrais changements oubliés durant cette étape. Ce critère permettra aux algorithmes de classification d'opérer sur des zones d'emprise assez faibles avec une combinatoire considérablement réduite. Une évaluation sur un plus grand nombre d'images sera effectuée afin de valider complètement l'approche.

##### *Classification des zones d'intérêt*

Des méthodes de mesures de changements, à l'aide des primitives extraites, dans les zones d'intérêt sont en cours d'évaluation. Un premier essai basé sur des primitives 2-D de type contour a été réalisé. Dans de très nombreuses situations, les primitives 2-D seules n'ont pas permis une classification suffisamment fiable des zones d'intérêt en changements et non changements. Ainsi, une approche utilisant des primitives 3-D a été adoptée. Ces primitives sont de différents types : coins, segments 3-D.

#### Extensions

- Améliorer la fiabilité de l'algorithme de focalisation en combinant plusieurs mesures de ressemblance.
- Poursuivre l'étude concernant la classification des zones d'intérêt en utilisant des techniques de *matching* de graphes.
- Utiliser des primitives de type points d'intérêt pour effectuer des mises en place photogramétriques pour des images provenant de capteurs différents et des images prises à des dates différentes.

## Publications

[JUNG 98] Franck Jung : *Présentation d'une technique de focalisation sur des zones de changements appliquée à la thématique bâti*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980028/C-RAP, 1998.

[RAJAONARISON 98] Jean Désiré Rajaonarison : *Appariement de points d'intérêt dans N images : application à la mesure automatique de points de liaison multiples pour l'aérotriangulation*, rapport de stage, DEA SIG Université de Marne-La-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 980010/C-STA, 1998.

## Axe comparaison vecteur-image

Olivier Jamet

Ce volet des recherches sur la détection de changement fait l'objet d'une thèse de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST), commencée en 1996, et dirigée par le professeur Henri Maître à l'ENST et par Hervé Le Men à l'IGN.

## Activité

L'année 1998 a été consacrée à la mise au point de mesures de comparaison entre un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) qualifié par une probabilité [Bulletin d'Information de l'IGN n° 69, activité Recherche 1997] et la Base de Données Topographiques.

Nous nous sommes attachés à analyser les sources d'incertitude liées, pour ce qui concerne le MNE, principalement à la présence d'occlusions dues aux parties cachées du couple, et aux possibles fautes d'appariement, et pour ce qui concerne la BD Topo, à la précision géométrique de la saisie et aux erreurs d'exhaustivité potentiellement présentes dans la base.

Nous avons proposé un modèle probabiliste pour les erreurs géométriques et pour les fautes d'appariement, complété d'une modélisation de l'inconnu lié aux occlusions dans le cadre de la théorie des croyances de Dempster-Shafer.

Cette modélisation de l'incertain est appliquée à la construction de mesures de ressemblance entre la base et le MNE, d'une part, comparant les emprises des îlots données par les deux sources d'information, et d'autre part, évaluant l'exhaustivité de la représentation interne de ces îlots.

L'évaluation expérimentale de ces mesures et la rédaction de la thèse, qui devrait être soutenue en décembre 1998, sont actuellement en cours.

## Publication

[JAMET 98] Olivier Jamet : *Comparaison vecteurs-images pour la détection des changements des bâtiments d'une base de données topographiques*, thèse de doctorat, laboratoire MATIS, IGN-SR 980005/C-THE, soutenue le 11 décembre 1998.

## C.1.5 Extraction automatique des routes sur images aériennes

Ghislaine Bordes et Laurent Guigues

### Objectifs

L'objectif de cette action de recherche est de développer un système d'extraction automatique des routes qui permette d'atteindre des résultats fiables (spécialement en zones rurales), qui soient faciles à contrôler et à corriger manuellement.

Cette année a été consacrée au développement de la maquette du système EAROU. Cette maquette permet de faire un recalage des routes dans des images de différents types (ortho-images, couples stéréoscopiques, images panchromatiques ou couleur) et à partir de graphes routiers issus de la BD Carto ou de cartes scannées vectorisées.

Le principe général de la méthode est de recalculer les arcs routiers du graphe initial sur l'image, puis de reconstruire les carrefours. L'étape de reconstruction des carrefours n'a pas été abordée pour l'instant.

### Recalage des arcs routiers

Pour chaque arc, une image englobante est extraite. Cette image est un " bandeau " rééchantillonné en fonction de la géométrie de l'arc et dont la largeur est réglée en fonction de la précision du graphe routier initial. En l'absence d'écarts aberrants (i.e. non conformes à la précision estimée du graphe initial) entre l'arc routier initial et la position exacte de la route dans l'image, la route traverse ce bandeau de gauche à droite.

Le recalage des arcs s'articule en deux étapes successives de recherche de chemins particuliers dans ce bandeau. Au cours de la première étape, on restreint l'ensemble des possibles sur un critère de parallélisme (cf. ci-dessous : " Détection de structures parallèles par un algorithme de simulation de propagation lumineuse "), en exhibant par optimisation dynamique dans un graphe dense parcourant l'image, les meilleurs chemins au sens du passage entre des bords parallèles.

Un terme de régularité sur la géométrie des chemins intervient également, et un critère de couleur peut être ajouté : seuls les éléments linéaires non saturés (c'est-à-dire gris) sont alors conservés. L'originalité de la méthode est d'utiliser une technique de programmation dynamique pour calculer tout un réseau de chemins possibles et pas un unique chemin optimal.

Une fois ce graphe des chemins possibles calculé, on y recherche les meilleurs chemins au sens de différents critères (homogénéité de largeur le long du chemin, de radiométrie...). Le chemin finalement retenu est celui qu'emprunte la majorité de ces chemins remarquables. Ce principe de vote, opposé à un choix par pondération des différents critères, nous apparaît plus pertinent car il permet de juger de l'ambiguïté du verdict (votes groupés ou éparpillés).

Enfin, le chemin retenu est soumis à une validation. Dans un premier temps, chaque point du chemin reçoit une valeur de confiance, en fonction de critères locaux. Les portions du chemin de qualité douteuse sont identifiées grâce à un seuillage par hystérésis sur les valeurs de confiance des points, puis interpolées. Une valeur moyenne de qualité de l'arc recalé est calculée, en fonction de la proportion de l'arc qui est validée.

### **Premiers résultats - perspectives**

La partie " recalage des arcs " a été mise en œuvre et testée sur différents sites. Une évaluation quantitative devra être effectuée. Les premiers résultats sont satisfaisants pour les zones rurales. L'utilisation de la couleur, qui permet d'éviter des recalages sur les bas-côtés, a été mise en œuvre récemment, et pourra être développée, notamment pour la phase de validation.

Les attributs sémantiques du graphe routier initiale devraient également pouvoir être utilisés plus systématiquement, en particulier pour régler les différents paramètres. Enfin, le recalage des arcs et la reconstruction du graphe seront beaucoup plus fiables si ces arcs correspondent à des itinéraires routiers et traversent certains carrefours. Un pré-traitement du graphe pour construire ces " macro arcs " correspondant à un même itinéraire routier – ce qui se traduit en général dans l'image par une continuité en radiométrie, en largeur et une faible courbure – devra donc être mis en place.

### **Détection des routes dans les images satellites à haute résolution**

La méthode mise en œuvre dans le système EAROU a été testée et adaptée pour des images satellites de résolution 1 à 2 m. Le principe général du recalage est identique à celui d'EAROU (recalage arc par arc, pré-traitement de l'image de bandeau, recherche du meilleur chemin par optimisation d'un critère de qualité). En revanche, le traitement de bas-niveau et le critère de qualité diffèrent. Le traitement de bas-niveau est fondé sur l'algorithme de morphologie mathématique du chapeau haut-de-forme, qui permet de détecter des lignes claires dans les images.

La recherche du meilleur chemin par optimisation se fait donc sur des mesures de qualité calculées dans l'image du chapeau haut de forme. Cette méthode a été testée sur différentes images de résolution un mètre, obtenues à partir de photos aériennes au 1 : 30 000 scannées et sous-échantillonnées ou à partir de photos aériennes au 1 : 60 000 scannées.

Les résultats montrent que cette méthode est satisfaisante, en dehors des zones urbaines. Par ailleurs, ce stage a montré l'évolutivité et la souplesse de la méthode proposée dans l'action de recherche " Extraction automatique des routes dans les images aériennes ".

### **Détection de structures parallèles par un algorithme de simulation de propagation lumineuse**

Un algorithme de détection de lignes parallèles dans des images a été mis au point pendant l'année et au cours d'un stage de DESS. Il consiste à estimer le parallélisme entre lignes de contraste présentes dans l'image en tirant parti du fait qu'entre deux bords parallèles, la propagation de rayons lumineux obéissant aux lois de l'optique géométrique est particulièrement favorisée (fibres optiques).

L'algorithme simule alors l'émission de rayons, leurs réflexions et leurs transmissions sur les lignes de gradient de l'image, et suit les chemins parcourus pour accumuler des estimations concernant les guides des rayons : largeur, position de l'axe, courbure, etc. Finalement, les lignes d'intense circulation lumineuse pour lesquelles les estimations paramétriques sont cohérentes traduisent la présence de structures parallèles dans l'image.

Cette méthode, par sa nature statistique et le fait qu'elle intègre des contraintes géométriques globales, s'est avérée particulièrement robuste au bruit, aux interruptions de bords et capable de détecter des structures parallèles y compris partiellement occultées, ou aux limites très peu contrastées.

### **Publications**

[CARTRON 98] H. Cartron : *Détection des routes dans les images satellites à haute résolution*, rapport de stage de DESS IASV (Informatique Appliquée aux Sciences de la Vie), laboratoire MATIS, IGN-SR 980011/C-STA, 23 septembre 1998.

[SANCHEZ 98] M. Sanchez : *Étude d'un algorithme de propagation de rayons pour la reconnaissance de routes*, rapport de stage de DESS Intelligence Artificielle, laboratoire MATIS, IGN-SR 980015/C-STA, septembre 1998.

## C.1.6 Restitution automatique des carrefours routiers

Sylvain Airault

### Contexte - objectifs

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

L'interprétation des carrefours est une étape essentielle de la reconnaissance automatique du réseau routier. Pour limiter la complexité du problème, nous cherchons à utiliser au mieux des données externes apportant une connaissance sur la géométrie (localisation approchée) et la topologie (nombre de branches, organisation des branches) du carrefour. Ces données externes sont fournies par la Base de Données Cartographiques de l'IGN (BD Carto) dont la précision géométrique est de l'ordre de 10 mètres et qui représente les branches principales du carrefour sans assurer une description fine des connexions internes au carrefour.

Il s'agit donc d'une approche descendante dans laquelle la connaissance *a priori* doit nous permettre de choisir entre différents modèles de carrefours et de piloter les traitements en conséquence.

### Travail réalisé

La représentation cartographique d'un carrefour, au-delà du respect de la précision géométrique et de la forme des tronçons de routes, se doit de mettre en évidence les caractéristiques sémantiques les plus pertinentes du carrefour telles que, par exemple, la présence d'un rond-point circulaire ou la présence d'un axe principal. Cela nous conduit à définir un modèle hiérarchique des carrefours routiers intégrant ces notions et à mettre en place une stratégie visant à se poser en premier les questions les plus discriminantes : existe-t-il un rond-point circulaire ? existe-t-il un axe principal qui traverse le carrefour ?

Un module de détection de ronds-points a été développé : il permet, dans un premier temps, de diagnostiquer la présence d'un rond-point par une recherche de formes circulaires et, dans un deuxième temps, de reconstruire le carrefour en positionnant l'axe de la chaussée pour le rond-point lui-même, ainsi que pour les branches entrantes. La partie bas-niveau de ce module est basée sur une transformée de Hough, dans l'espace des cercles.

Un module de détection des axes principaux a été développé : il s'agit de mettre en correspondance des hypothèses de route, en recherchant des couples d'hypothèses ayant des caractéristiques communes en termes de radiométrie, de géométrie et de largeur de route. La reconstruction de l'axe de route est ensuite effectuée par une interpolation minimisant la courbure (on utilise des splines), et le raccord des branches secondaires sur l'axe principal est obtenu par projection. L'extraction d'hypothèses locales de routes est basée sur une transformée de Hough dans l'espace des droites.

Par ailleurs, nous avons mis en place une stratégie de " retour en arrière " en cas d'échec, pour pouvoir, le cas échéant, " remonter " à l'extraction de nouvelles hypothèses de routes si la reconstruction finale du carrefour n'est pas satisfaisante.

### Perspectives

Les perspectives à court terme vont consister à finaliser et à fiabiliser les phases de reconstruction, à la fois dans le cas des ronds-points circulaires, et dans le cas des carrefours simples (avec ou sans axe principal).

Il s'agira, ensuite, d'intégrer dans le système des modèles de carrefours plus complexes, en prenant notamment en compte des séparateurs de chaussées (terre-pleins, zébras,...).

A plus long terme, parallèlement à la rédaction du rapport de thèse, des tests de validation sur un échantillon important de carrefours seront effectués.

### Publications

[BOICHIS 98] N. Boichis, J.-P. Cocquerez & S. Airault : *A Top Down Strategy for Simple Crossroads Automatic Extraction*, ISPRS, Commission II, WG 6, Cambridge (GB), juillet 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980017/S-COM, 1998.

[MASCARÉNAS 98] E. Mascarénas : *Modélisation et extraction automatique des ronds-points dans les images aériennes*, rapport de stage du DESS de Mathématiques appliquées, Université Paris-6, laboratoire MATIS, IGN-SR 980014/S-STA, août 1998.

## C.1.7 Habillage photogrammétrique de sites urbains

Jocelyn Marchadier

### Contexte - objectifs

Notre travail au sein du laboratoire MATIS a pour objectif l'automatisation du calcul de l'orientation absolue de clichés terrestres de façades en multi-recouvrement, à l'aide d'un canevas connu de points d'appuis liés entre eux par

des relations topologiques (modèle polyédrique de type TRAPU). L'étude de l'appariement d'un objet 3-D, conçu au moyen d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur et de son image sur un ou plusieurs clichés a déjà été réalisée par de nombreux chercheurs. Le problème auquel nous sommes confronté est sensiblement différent, puisqu'il s'agit ici d'apparier un ensemble d'objets, dont la topologie et la précision est différente de leurs homologues issus des clichés terrestres (le bâti n'est pas perçu de la même façon lorsqu'il est vu par un piéton ou vu sur une photographie aérienne). Les applications de ce travail sont diverses. La demande de modèles 3-D texturés, notamment pour des applications de réalité virtuelle, se fait de plus en plus pressente. Une compensation par faisceau, nous permet d'obtenir des sommets terrains de meilleure précision, et l'information radiométrique présente sur les clichés terrestres peut servir à "habiller" le modèle.

La robustesse d'une chaîne automatique de levé photogrammétrique de clichés terrestres à l'aide de points d'appuis moins précis que la résolution du procédé de prises de vues nécessite :

- un ensemble de points de liaison relativement important, pour rendre la bande de clichés rigide vis-à-vis des déformations éventuelles dues à la différence de résolution des deux sources d'information,
- la connaissance de l'image de chaque point d'appui sur les images, garantissant ainsi la robustesse du calcul photogrammétrique et l'obtention d'une meilleure estimation de la position des points d'appuis, visibles depuis les clichés.

La fusion monocapteur de données terrestres et aériennes a déjà été étudiée dans les années 80 [VERESS 80]. Nous nous intéressons, ici, au processus d'appariement automatique.

L'approche envisagée est la suivante :

- extraction de primitives, de même nature que les projections des primitives du modèle sur les images (coins, jonctions, segments de droites),
- appariement des primitives sur l'ensemble des clichés terrestres,
- calcul de l'orientation relative et filtrage des appariements erronés,
- filtrage des primitives 2-D, suivant les spécifications de conception du modèle 3-D,
- les primitives à appareiller sont plongées dans le même espace (projection de primitives du modèle ou reconstruction des primitives des images en 3-D),
- génération d'hypothèses d'appariements, en utilisant le maximum de connaissances a priori sur le modèle et le procédé de prises de vues (points de fuite, contrainte d'ordre,...),
- calcul de l'orientation absolue, filtrage des faux appariements au moyen d'un estimateur robuste.

## Étude préalable

Nous avons réalisé un ensemble de prises de vues sur un chantier-test : la rue du Faubourg Saint Antoine. Le modèle TRAPU de Saint Antoine nous a été fourni par le SPCN, service de photogrammétrie de l'IGN. Celui-ci a été réalisé à partir de photographies aériennes au 1 : 4 000. L'erreur quadratique des coordonnées planimétriques des sommets du modèle est de l'ordre de 15 centimètres.

Les prises de vues de façades ont été réalisées à l'aide d'un appareil photographique 24 x 36, doté d'un objectif Nikon de 20 millimètres de distance principale. Les diapositives obtenues ont été scannées à 12 microns, puis sous-échantillonnées d'un facteur 4 (pixel de 50 microns). Un fort recouvrement (80% et plus) a été choisi pour réaliser des tests (non encore effectués), sur la qualité du résultat de la compensation en fonction du recouvrement.

Le modèle du Faubourg Saint-Antoine est suffisamment fidèle à la morphologie des bâtiments, ce qui nous a permis d'appareiller manuellement, les coins du modèle avec leurs homologues 2-D supposés (points correspondant aux extrémités du périmètre des toits). Une aérotriangulation a été réalisée en utilisant TopAero PC, développé au laboratoire MATIS.

Le résultat du calcul est de bonne qualité (10 microns d'erreur quadratique moyenne sur les mesures clichés). Nous avons ensuite projeté les photographies sur le modèle pour obtenir des textures rectifiées.

Quelques remarques : bien que nous ayons appareillé les sommets du modèle avec des points des images, cet appariement sera difficile à réaliser, dans le cadre d'un processus automatique (il est difficile de caractériser les "coins" du périmètre de chaque toit sur des images raster).

Il semble, par contre plus aisé d'appareiller des segments de droites (contrainte supplémentaire pour avoir un espace de recherche plus restreint, donc une combinatoire moins élevée). Pour exploiter ce type d'appariement dans une compensation, il faut ajouter de nouvelles équations, comme, par exemple, celles présentées dans [MACGLONE]. Nous évaluerons l'impact de telles équations sur la précision du calcul photogrammétrique.

## Extraction de primitives

Le premier pas vers une automatisation du processus d'appariement est l'extraction de primitives. Les primitives, généralement recherchées sur des images et utilisées pour un appariement entre images, peuvent être classées en

points caractéristiques (coins, jonctions), lignes caractéristiques (droites, courbes quelconques appartenant aux contours des objets visibles), et régions.

Les algorithmes d'extraction de primitives introduisent généralement un certain nombre de paramètres. Ces paramètres posent de réels problèmes :

- leurs valeurs optimales sont très sensibles aux images d'entrée des algorithmes,
- un mauvais paramétrage donne des résultats peu satisfaisants pour l'extraction de primitives, surtout lorsque les primitives à extraire sont de la taille du " bruit ",
- ils interdisent l'emploi des logiciels d'analyse d'images en production car le réglage des paramètres nécessite une formation très spécifique.

Plusieurs algorithmes existent, permettant l'extraction de chaque type de primitives indépendamment, ou pour réaliser une segmentation en fusionnant l'information apportée par les contours des objets (dont la détection est toujours bruitée) et par des régions homogènes. Mais peu de chercheurs utilisent des algorithmes pour extraire simultanément des primitives de nature différentes, d'une manière cohérente.

L'approche que nous avons adoptée est fondée sur la topologie discrète. Nous voulons extraire une topologie continue à l'aide de modèles. L'idée initiale de ce travail, était d'extraire les crêtes de l'image du module du gradient de chaque cliché initial, ce qui décompose naturellement une image en contours possibles d'objets (les crêtes du gradient, qui correspondent à une discontinuité probable de la fonction d'éclairément du capteur au moment de la prise de vue), et en régions cohérentes.

Nous avons, pour ce faire, utilisé le travail exposé dans [EVERAT, BERTRAND 96]. Everat et Bertrand définissent une opération d'amincissement, sur des images en niveaux de gris préservant la topologie de celles-ci. Nous avons proposé plusieurs opérations permettant d'améliorer sensiblement la localisation des crêtes extraites et de fusionner celles-ci avec des informations issues d'une autre source (par exemple, fusion de crêtes et de points d'intérêts). Nous avons également proposé un algorithme permettant d'étiqueter les crêtes suivant l'importance des contrastes le long des contours. Les chaînes de contours obtenues sont longues et correspondent souvent aux contours d'un même objet.

Nous avons ensuite introduit un modèle de contours (segment de droite) et avons développé un algorithme qui permet d'étiqueter les courbes discrètes obtenues à l'étape précédente. Les modèles permettent de tenir compte de la connaissance *a priori* disponible sur les scènes que nous étudions, et nous permettent de filtrer les crêtes qui ne nous intéressent pas dans la suite du processus. Ces modèles nous permettent également d'obtenir des hypothèses de coins et de jonctions bien localisées.

## Conclusion et perspective

L'algorithme d'extraction de droites et de points d'intérêt que nous avons développé nécessite le réglage d'un unique paramètre, qui dépend de la taille des pixels traités. Le bruit peut être supprimé par l'introduction d'un seuil sur la longueur des droites extraites.

L'étude d'estimateurs robustes et d'une stratégie d'appariement 2-D/3-D devrait être envisagée cette année. Nous comptons également terminer l'étude entreprise sur l'extraction de modèles, en se servant du résultat d'une ligne de partage des eaux appliquée à l'image d'un gradient, en introduisant par exemple, d'autres types de modèles linéaires (coniques,...).

## Références

- [VERESS 81] S.A. Veress : *A Combination of Aerial and Terrestrial Photogrammetry for Monitoring*, in *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 47(12), December 1981, pp. 1725-1731;
- [EVERAT, BERTRAND 96] J.C. Everat and G. Bertrand : *New topological operators for segmentation*, in *Proceedings ICIP'96*, vol. 3, pp. 45-48, IEEE Signal Processing Society, 1996.

## C.1.8 Bibliothèque de photogrammétrie numérique à l'usage des chercheurs

Yann Wehrstedt

### Contexte

Dans le contexte des besoins du laboratoire MATIS en aérotriangulation concernant les images des caméras numériques, les deux principaux axes de la présente action de recherche ont été la finalisation du logiciel TopAéro-PC et la mise au point de processus de mesure automatique de points de liaison pour la caméra numérique.

## Travaux effectués

### Logiciel TopAéro-PC

Les développements sur TopAéro-PC ont été motivés par les cas spéciaux de photogrammétrie devant être traités au laboratoire MATIS, par la demande d'Yves Egels (IGN-ENSG), de finaliser le logiciel et la demande du Service de Photogrammétrie et de Cartographie Numérique (SPCN) d'en faire un outil de production pour le Département des Canevas.

Ils concernent essentiellement la prise en compte de mesures-images en très grand nombre, issues de processus automatiques, la prise en compte simultanée de mesures sur film (exprimées en microns) et sur image (exprimées en pixels) et la fiabilisation des procédures de détection de fautes. Un manuel utilisateur a été rédigé [WEHRSTEDT 98b].

D'autre part, un travail de validation des résultats du logiciel, préalable à son passage en production, a été mené conjointement avec le SPCN [BRANCHU 98], ainsi qu'une réflexion sur la modélisation d'une base de données d'aérotriangulation [WEHRSTEDT, BRANCHU 98].

### Traitements photogrammétriques pour la caméra numérique

Après la prise de vue aérienne réalisée par caméra numérique sur Le Mans (F) en septembre 1997, le logiciel PHODIS-AT de ZEISS a été testé pour la mesure automatique des points de liaison [WEHRSTEDT 98a]. Ces tests ont mis en évidence certains manques de ce logiciel (qui est prévu pour traiter des photos scannées), et nous ont convaincus de la nécessité d'acquérir une maîtrise des outils de mesure automatique.

Dans cette optique, deux stages ont été proposés :

- mise en correspondance d'images : construction automatique du tableau d'assemblage d'un bloc de prise de vues [OUDINE 98]. Ce stage mettait en œuvre des techniques simples de corrélation automatique et a abouti à la réalisation d'un système modulaire générant des tableaux d'assemblage, sans hypothèses initiales autres que l'ordre de prise de vues des clichés et le découpage des bandes. Les images fortement sous-échantillonnées sont assemblées en 2-D par une composition de translation-rotation évaluée d'abord couple par couple, puis entre les bandes (avec détection des bandes tournées à 180°). Enfin les paramètres sont optimisés de façon globale pour l'ensemble des images. Ce système a donné des assemblages très convaincants sur différents types d'images et de paysages testés (urbain, désertique, montagneux, forêt),
- appariement de points d'intérêt dans  $N$  images : application à la mesure automatique de points de liaison multiples pour l'aérotriangulation [RAJAONARISON 98].

L'objet de ce stage était d'évaluer l'utilité de points d'intérêt pour la mesure de points de liaison dans plusieurs images. Les paramètres de recherche à pleine résolution sont initialisés par une étape préalable à basse résolution. Partant de points d'intérêt extraits par le détecteur de Harris, une corrélation croisée suivie d'une accumulation de vecteurs de parallaxe, est mise en œuvre pour apparier les points dans chaque couple d'images, traitement à l'issue duquel les points multiples sont regroupés.

On aboutit à quelques centaines de points multiples sur images 4 000 x 4 000, l'ordre de multiplicité pouvant aller jusqu'à 7 pour les tests effectués. La validation photogrammétrique de ces mesures a montré un très faible taux d'erreur (au plus 5%) et une  $emq$  de 1/3 de pixel pour l'orientation relative du bloc d'images : cet outil est donc très intéressant pour une exploitation photogrammétrique.

Optimisation des outils de mesure automatique : les outils issus des deux stages précédents ont été repris, optimisés et rendus plus robustes par Frank Fuchs et Franck Jung. Ce travail a réduit considérablement les temps de calcul nécessaires. Les outils sont disponibles, sous forme de fonctions facilement utilisables par les chercheurs, et sont présentés dans [FUCHS et al 98].

## Suite des travaux

Les outils de mesure automatique doivent être validés, d'une part, sur un grand nombre de configurations de prises de vues pour évaluer leur robustesse, et, d'autre part, sur des zones-tests, comportant un grand nombre de points d'appui et de contrôle pour évaluer l'apport du nombre de mesures élevé en termes de rigidité du modèle photogrammétrique. Il serait, d'autre part, souhaitable d'approfondir la connaissance de l'étalonnage des caméras numériques.

Des extensions sont envisageables pour ces travaux : il s'agit du guidage du tableau d'assemblage par les mesures du GPS embarqué, de la prise en compte d'une forte rotation et d'un changement d'échelle entre les images d'un couple et de l'introduction de points d'intérêt sub-pixellaires.

## Publications

[BRANCHU 98] S. Branchu : *Rapport de tests du logiciel TopAéro-PC*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980030/C-RAP, octobre 1998.

- [FUCHS et al 98] F. Fuchs, F. Jung & Y. Wehrstedt : *Chaîne de calcul de points de liaison automatiques pour l'aérotriangulation des prises de vues des caméras numériques*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980031/C-RAP, 1998.
- [OUDINE 98] C. Oudine : *Mise en correspondance d'images : construction automatique du tableau d'assemblage d'un bloc de prise de vues*, rapport de stage de l'Université René Descartes, laboratoire MATIS, IGN-SR 980016/C-STA, septembre 1998.
- [RAJAONARISON 98] Jean Désiré Rajaonarison : *Appariement de points d'intérêt dans N images : application à la mesure automatique de points de liaison multiples pour l'aérotriangulation*, rapport de stage, DEA SIG, Université de Marne-La-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 980010/C-STA, 1998.
- [WEHRSTEDT 98a] Y. Wehrstedt : *Aérotriangulation d'une prise de vue réalisée par la caméra numérique*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980007/C-RAP, janvier 1998.
- [WEHRSTEDT 98b] Y. Wehrstedt : *TopAéro-PC : Manuel utilisateur*, laboratoire MATIS, IGN-SR 980008/C-MAN, mars 1998.
- [WEHRSTEDT, BRANCHU 98] Y. Wehrstedt & S. Branchu : *TopAéro-PC : Modélisation des données d'un système d'aérotriangulation automatisé*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980029/C-RAP, août 1998.



Christian Thom (responsable du thème instrumentation)

## C.2.1 Fabrication d'une caméra numérique

Christian Thom

### Contexte

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

L'arrivée annoncée d'images satellitales à résolution métrique, devrait encore accélérer les besoins en imagerie numérique aéroportée, en l'orientant vers les plus grandes échelles. On peut prévoir aussi que le développement de l'Internet permettra au grand public de consulter directement des images aériennes numériques et donc en promouvra la vente.

### Objectifs

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

### Activités - résultats

Le programme de recherche décidé l'an passé, a passablement été bouleversé par l'intérêt assez général soulevé par nos images couleur prises sur Le Mans (F). Il a notamment été décidé de produire nous-mêmes les caméras dont nous avons besoin pour nos travaux de production, malgré les difficultés prévisibles de ce type d'opération pour un laboratoire de recherche.

Dans un premier temps, cinq caméras seront construites, pour, d'une part, commencer à équiper les avions de l'IGN, et d'autre part, mettre au point une caméra couleur constituée de trois caméras 4k x 4k munies de filtres colorés. Ce passage au stade industriel a évidemment posé plusieurs problèmes qui ont eu un impact important sur le programme initialement prévu.

En plus de ce changement d'axe de recherche, beaucoup de l'activité du laboratoire a été détournée vers des tâches de " production ", liées aux missions sur Saumur et Rennes (F). Il faut aussi souligner, que l'utilisation des caméras pour la production rend en pratique impossible toute modification ou amélioration, les caméras étant, soit en mission, soit en attente de mission à Creil.

#### Travaux sur et autour de la caméra

La réalisation d'une caméra de format plus grand, soit 4 096 x 4 096 pixels, a été terminée. On peut y adapter les objectifs munis d'obturateurs rapides de chez ROLLEI, ce qui met à notre disposition toute une gamme de focales, allant de 30 mm à plus de 200 mm. L'ensemble de l'informatique ayant été dupliqué, nous disposons donc de deux capteurs complets permettant des missions mixtes couleur/panchro, ou, avec différentes focales.

Le développement d'une nouvelle version d'une des cartes et du logiciel de la caméra a été rendu nécessaire par l'obsolescence du micro-contrôleur. Un système de développement pour MC68HC11 a donc été acheté et est sur le point d'être livré. Les logiciels et la nouvelle carte sont donc réalisés, mais non encore testés.

A l'occasion de la mission sur Rennes (cf. infra), les logiciels de traitement bas-niveau des images couleur, corrections radiométrique et colorimétrique, ont été revus et améliorés. De même, les logiciels temps-réel de gestion à bord de l'avion ont été améliorés, notamment pour faciliter le réglage du temps d'exposition.

Comme annoncé plus haut, d'autres améliorations avaient été prévues, mais n'ont pas pu être réalisées par manque de disponibilité de la caméra, celle-ci étant soit en mission, soit en attente de mission.

La réalisation prévue de caméras supplémentaires devrait permettre de régler ce type de problèmes. Le même système de disques amovibles a été installé sur les deux racks, permettant ainsi une utilisation plus rationnelle de l'ensemble des disques existants.

Un système informatique de bureau, analogue aux systèmes embarqués et permettant de lire les disques enregistrés en vol a été acquis. Il est destiné à être intégré à un système plus vaste, en cours de définition, dédié à la récupération, au traitement et à l'archivage des données issues de la caméra.

Une plate-forme stabilisée adaptée à la masse de la caméra est en cours de développement. Elle permettra, dans un premier temps, l'asservissement de l'axe de visée à la verticale, puis le repointage éventuel, pour suivre un axe au sol.

### *Missions aériennes*

La nouvelle caméra 4k a effectué son premier vol sur Saumur, le 15 mai 1998. Un problème de disque dur a été détecté en cours de mission, qui a donc été interrompue. Ce problème a été résolu dans les jours suivants et la mission a pu finalement se faire le 19 juin.

Son exploitation est en cours, au Service de l'Information Topographique (SIT). Un problème déjà constaté, est un mauvais recouvrement entre certaines bandes. Neuf bandes de trente-sept images ont été acquises.

En mai, la caméra 3k x 2k, en version panchro, a poursuivi la série de missions pour le CNES dans le cadre du plan de préparation des utilisateurs de SPOT-5, en vue de simulation de la haute résolution. Cette caméra a été remontée en version couleur pour voler en août, pour une mission commandée par la ville de Rennes, concernant la couverture d'une zone de 11 x 10 km à un pixel-sol de 30 cm.

Cette mission a été faite deux fois, la première, le 6 août, ayant bénéficié d'une météo de qualité insuffisante pour l'application visée.

La mission s'est en effet terminée avec une couverture nuageuse à 5/8 d'alto-cumulus. Cette mission a toutefois permis de constater que les images numériques seraient exploitables dans ces conditions pour la restitution, alors que les photos traditionnelles prises simultanément ont été rejetées.

Cette mission s'est finalement correctement déroulée le 21 septembre et est en cours d'exploitation. Les images seront utilisées pour la réalisation d'une ortho-image, au pixel-sol de 30 cm, et plus tard, grâce aux algorithmes développés par le laboratoire MATIS, à la réalisation d'une maquette virtuelle de la ville de Rennes.

### *Relations avec les industriels*

Les contacts initiés avec Aérospatiale et Zeiss n'ont finalement pas abouti. Pour éviter de perdre plus de temps dans notre projet, il a été décidé de ne compter, dans un premier temps, que sur nos propres compétences.

### **Suite**

Les différents axes engagés en 1998 seront poursuivis en 1999. Un accent particulier sera porté sur la manière de déterminer la taille de pixel-sol, nécessaire à telle ou telle application, et notamment par comparaison avec les échelles de prise de vue utilisées en photographie.

### **Publication**

[THOM, SOUCHON 98] Ch. Thom & J.-Ph. Souchon : *Le point sur les caméras numériques de l'IGN*, in Bulletin de la SFPT n° 151, 1998/4, laboratoire OEMI, IGN-SR 980018/L-ART, 1998.

## C.2.2 Nouvelles technologies pour la télémétrie laser sur satellites

Michel Kasser et Olivier Bock

### Contexte

Le projet consiste à rechercher de nouvelles solutions, pour faire évoluer la télémétrie laser sur satellites vers des dispositifs susceptibles de mesurer avec des biais extrêmement réduits par rapport aux technologies actuellement employées.

Cette recherche prend la suite de plusieurs études menées depuis quelques années à l'IGN, depuis la mise au point de la Station Laser Ultra Mobile, développée entre l'IGN, l'OCA, le CNES et l'INSU de 1989 à 1996.

### Objectifs

Les objectifs pour 1998 étaient d'approfondir une méthode utilisant des impulsions optiques longues (quelques centaines de microsecondes), modulées par une cellule de Pockels externe, à une fréquence élevée (de 500 MHz à 1 GHz). De telles impulsions longues sont en effet faciles à obtenir, à partir des sources laser YAG actuellement utilisées sur les stations du réseau mondial, et une modulation externe pouvait être conçue assez aisément.

### Activités - résultats

Les problèmes de modulation externe sont de plusieurs natures :

- conservation, plus ou moins bonne, de la polarisation de la lumière émise lors de sa réflexion sur les coins-de-cube du satellite. Une étude de ce point avait conclu en 1996, à une conservation assez médiocre de cette polarisation selon l'incidence du rayon sur le réflecteur, et il avait alors été plutôt retenu l'idée d'une modulation d'intensité,
- difficulté de moduler un faisceau laser de grande puissance crête sans destruction. Le problème tient alors, sur le choix d'un matériau de grande résistance au dommage optique, mais alors, celui-ci exige une tension de modulation très élevée et donc difficile à obtenir.

Nous avons donc simultanément travaillé sur deux aspects :

- obtention d'une tension élevée à une fréquence de 1 GHz, grâce à un convertisseur d'impédance (cavité réentrante accordée). Un matériel d'amplification a été spécifié et il est désormais en cours d'acquisition,
- spécification d'un modulateur à cellule de Pockels, et tests en puissance crête. Le modulateur a été reçu et les essais sont en cours.

Par ailleurs, une nouvelle conception d'une chaîne de mesure dépourvue de biais a été proposée à la collectivité scientifique internationale lors du Symposium international de SLR à Deggendorf (Allemagne), en septembre 1998. Ce concept nouveau a été bien accueilli et de nouveaux essais vont démarrer sous peu.

Le principe consiste à utiliser la chaîne de mesures mise au point pour le TAMS (télémetre laser aéroporté en champ large pour la mesure des subsidences) de l'IGN pour traiter les échos reçus, tout en calibrant en permanence l'ensemble de la chaîne de réception avec une diode laser émettant des impulsions régulières en sortie d'un étalon de fréquence. Par ce moyen, nos évaluations montrent que la plupart des biais résiduels de mesure devraient être éliminés avec très peu de modifications à effectuer sur une station existante.

### Publication

[KASSER, BOCK 98] M. Kasser & O. Bock : *A new way for reducing biases in SLR timing*, 11th International Symposium on SLR Instrumentation, 21-25 septembre 1998, Deggendorf (D), laboratoire OEMI, IGN-SR 980009/L-COM, 1998.

## C.2.3 Prototype d'instrumentation aéroportée télémétrie laser (dispositif TAMS)

Christian Thom, Olivier Bock et Michel Kasser

### Contexte

Il s'agit de notre participation à la mise en valeur du procédé breveté par l'IGN en 1990.

Une partie des études a été financée par un contrat avec Elf-Aquitaine (contrat à frais partagés).

En 1992, nous avons validé une première simulation numérique du système projeté.

Un contrat, signé en octobre 1992, nous a permis de commencer le prototype du matériel embarqué et la réalisation de tests au sol. Un avenant en 1994 a permis de poursuivre le co-financement. Cette étape a également nécessité l'achat d'un laser et d'un système informatique embarquable.

En 1995, des missions sur le terrain ont été réalisées pour tester l'instrumentation, à Saint-Etienne de Tinée et à Combs-la-Ville, permettant de valider une partie du processus. Ce travail a fait l'objet de la thèse de Olivier Bock depuis 1993, qui a été soutenue à la fin de l'année 1996. En 1997, un nouveau laser (picoseconde) a été acquis par l'École Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT) pour servir de source embarquable dans un avion. Ce laser a été testé et validé, et l'ensemble de l'instrumentation a été préparé pour faire une première mission aérienne en 1998.

## Objectifs

Cette nouvelle méthode de mesures doit permettre d'évaluer des variations de position et notamment d'altitude de l'ordre du millimètre sur des surfaces importantes, en des points équipés de rétroreflecteurs laser. Ceci se révèle particulièrement important sur des zones d'extraction de fluides, comme le pétrole ou le gaz, où les phénomènes de subsidence sont symptomatiques de variations de contraintes dans le sous-sol.

L'originalité de la méthode réside dans la simplicité de son instrumentation : mis à part le laser picoseconde, classique en télémétrie laser mais relativement délicat à embarquer en avion ou en satellite, la détection se compose simplement d'une photodiode de grande surface active sans optique, d'un amplificateur large bande - faible bruit, d'un oscilloscope numérique rapide et d'un PC portable pilotant l'ensemble des matériels.

La mesure simultanée d'au moins quatre distances (nécessaires pour localiser précisément l'avion et résoudre une inconnue instrumentale) se fait grâce à la divergence importante du faisceau laser, obtenue par une lentille ou un dépoli. La très bonne précision du procédé est obtenue grâce à un traitement du signal numérique avant l'optimisation (ajustement des positions des rétroreflecteurs au sol par moindres carrés).

## Activités - résultats

L'année a été principalement consacrée à la réalisation de la mission aérienne à bord de l'ARAT. L'optimisation finale de l'étage photodiode-amplificateur a été l'objet du stage de Benoît Viallet (INSA de Rennes), avec notamment l'essai de nouvelles photodiodes plus rapides et l'adoption pour l'amplificateur d'ampli opérationnels bas bruit et large bande.

Une première tentative a eu lieu en mars 1998, sur la base de Creil, mais elle a échoué pour part, à cause du temps important qu'il a fallu consacrer à l'installation et à la mise au point du matériel dans l'avion, d'une grève du contrôle aérien, de la défaillance d'un convertisseur 28V DC /220V AC de puissance, et d'une météo défaillante lorsque tout a été enfin prêt.

Un autre créneau a été mis à notre disposition en mai 1998 et, le site de Creil ayant été abandonné à cause de son inconvénient (zone militaire), un autre a été choisi sur Crucey (cf. dernière publication ci-dessous). Une surface de 1,2 x 1,2 km<sup>2</sup> a été garnie de 8 x 8 coins de cube et a été survolée deux fois pendant quatre heures. Six mille tirs laser ont été enregistrés, la précision en monocoup variant de 1 à 5 cm devant amener une précision verticale finale de 2-3 mm.

Simultanément, des mesures météo ont été réalisées à terre et dans l'avion, pour permettre une meilleure exploitation des données. Les données acquises n'ont pas été pour l'instant traitées complètement, les programmes de traitement devant être adaptés à l'expérimentation aérienne. Elles le seront durant la fin d'année 1998.

## Suite

Un premier traitement des données assez grossier pourra être réalisé d'ici fin 1998. Un traitement plus adapté à cette mission sera fait début 1999, le reste de l'année étant consacré à la rédaction de publications sur cet essai et à la présentation des résultats à des congrès, ou à des industriels qui pourraient être intéressés. Si aucun intérêt ne se manifeste, le projet sera arrêté.

## Publications

[BOCK et al 94] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser, D. Bruneau and J. Pelon : *Laser ranging accuracy limitations by transverse mode distortions in Q-switched lasers*, laboratoire OEMI, IGN-SR 940022/L-RAP, 1994.

[BOCK et al 95] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser and D. Fourmaintraux : *Development of a new airborne laser subsidence measurement system, aiming at mm-accuracy*, in Proceedings of the 5th International Symposium on Land Subsidence, F. B. J. Barends, F. J. J. Brouwer, F. H. Schröder, ed., Balkema, Rotterdam (NL), pp. 113-122, laboratoire OEMI, IGN-SR 950002/L-COM, 1995.

- [BOCK et al 96] O. Bock, M. Kasser and Ch. Thom : *A wide angle airborne or spaceborne laser ranging instrumentation for subsidence measurement*, in Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Y. Fumin and C. Wanzhen, ed. (Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China, 1996), pp. 32–42, laboratoire OEMI, IGN-SR 960010/L-COM, 1996.
- [BOCK et al 96] O. Bock, Ch. Thom et M. Kasser : *Développement d'un système de télémétrie laser en champ large destiné à la mesure de mouvements verticaux du sol de l'ordre du millimètre*, in Revue Internationale de Geomatique, vol. 6, n° 2-3, 149–161, laboratoire OEMI, IGN-SR 960016/L-ART, 1996.
- [BOCK 96] O. Bock *Etude et réalisation d'un télémètre laser aéroporté en champ large sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol. Etude de l'adaptation du système à un véhicule satellitaire*, thèse de Doctorat, Université Paris-7, laboratoire OEMI, IGN-SR 960017/L-THE 1996.
- [BOCK et al 97] O. Bock, M. Kasser and Ch. Thom : *A wide-angle airborne laser ranging system for millimeter accuracy subsidence measurements*, in Proceedings of the EOS Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications, Nantes (F), laboratoire OEMI, IGN-SR 970006/L-COM, 1997.
- [BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser, Ch. Thom and J. Pelon : *Wide-angle airborne laser ranging for precise relative positioning : ground-based experiments and aerial simulations*, in Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Techniques, U. Schreiber and C. Werner, ed., in Proc. SPIE 3218, Washington (USA), pp. 92–104, laboratoire OEMI, IGN-SR 980013/LCOM, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser and C. Thom : *A wide - angle airborne laser ranging system for millimeter accuracy subsidence measurements*, in Journal of Optics, vol. 29, n° 3, pp. 220–224, laboratoire OEMI, IGN-SR 980001/L-ART, June 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser, Ch. Thom and J. Pelon : *Study of wide angle laser ranging system for relative positioning of ground-based benchmarks with millimeter accuracy*, in Journal of Geodesy, vol. 72, n° 7/8, 442-459, laboratoire OEMI, IGN-SR 980007/L-ART, 1998
- [BOCK et al 98] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser, and J. Pelon : *Multilateration with the wide angle laser ranging system : ranging performance and first ground-based validation experiment*, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (sous presse), laboratoire OEMI, IGN-SR 980014/L-COM, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock : *Multilateration with the wide-angle airborne laser ranging system : positioning precision and atmospheric effects*, in Applied Optics, laboratoire OEMI, IGN-SR 980010/L-ART, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock : *Relative positioning precision of the wide-angle airborne laser ranging system*, in Pure and Applied Optics, laboratoire OEMI, IGN-SR 980011/L-ART, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser, and Ch. Thom : *First aircraft experiment with the WA-ALRS*, in Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Deggendorf (Allemagne), 21-25 septembre 1998, laboratoire OEMI, IGN-SR 980008/L-COM, 1998.

## C.2.4 Systématismes des prises de vues aériennes et trajectographie

Christian Thom et Thierry Duquesnoy

### Contexte

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

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

### Objectif

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

### Activités - résultats

L'année 1998 a principalement consisté en une étude de l'existant dans le domaine de l'aide à la navigation aérienne assistée par GPS.

Des contacts fructueux ont été noués avec la société Sercel. Ces contacts ont abouti, entre autres, à du prêt de matériel pour acquérir des données et pour tester leur système de résolution d'ambiguïté en vol, en particulier, pour connaître à quelle distance maximale la station de référence doit se trouver de l'avion pour pouvoir résoudre les ambiguïtés dans un laps de temps raisonnable.

Le prêt du matériel n'est intervenu que dans le courant du quatrième trimestre de l'année. Le système GPS permettant de mesurer l'attitude de l'avion n'a pu encore nous être prêté. Des tests du système Racal, devant permettre de naviguer en connaissant la position de l'avion avec une position métrique seront effectués parallèlement aux tests précédents.

## **Suite**

Les fins d'années 1998-1999 seront consacrées à l'écriture du logiciel de trajectographie. Ce logiciel basé sur un calcul à partir des pseudo-distances lissées par la phase devra prendre en compte les données des deux fréquences et les données de l'IGS, les orbites recalculées des satellites. Il devra pouvoir intégrer des données de tous types de récepteurs et fournir une trajectoire du mobile à partir de plusieurs stations fixes.

## Base de données géographiques

### C.3.1 Mécanismes de mise à jour entre bases de données géographiques

Thierry Badard

#### Contexte

À l'heure où nous commençons à disposer d'un grand nombre de bases de données ayant nécessité de gros investissements, à la fois de la part des producteurs de données et des utilisateurs, la question de la mise à jour semble cruciale vue l'évolution rapide des données.

L'Institut Géographique National, producteur de bases de données géographiques et des produits cartographiques qui en dérivent est tenu de maintenir à jour toutes ses productions. Du fait de la complexité du processus de fabrication des produits cartographiques à partir des bases de données, on peut s'interroger sur la démarche à suivre pour mettre à jour ces produits dérivés.

En particulier, il pourrait être intéressant de réutiliser les mises à jour effectuées sur une base de données pour les reporter sur une autre base : c'est une situation à court terme pour ce qui est de la mise à jour des produits cartographiques (TOP25, TOP100, Plans de Villes).

C'est une situation à plus long terme pour ce qui est de la mise à jour en parallèle d'un ensemble de bases de données, incluant donc la mise au point et l'actualisation d'une base de données multi-représentations, ou la propagation et l'intégration des évolutions chez un client.

#### Objectifs

Les objectifs de cette action de recherche qui a débuté en 1997 sont triples :

- spécifier les mécanismes de mises à jour de produits dérivés à partir des mises à jour de leurs bases de données sources, il est nécessaire pour cela d'établir une classification précise des opérations de mise à jour,
- maîtriser les mises à jour concomitantes de plusieurs bases évoluant indépendamment, notamment d'une base client ayant subi des transformations non contrôlables *a priori* par le fournisseur, des données exogènes pouvant être introduites par le client et compliquer considérablement la propagation des mises à jour,
- mettre au point une base de données multi-représentations permettant, entre autres, d'aider à la réalisation des objectifs ci-dessus. Maîtriser les outils permettant de propager dans cette base multi-représentations, les mises à jour par analyse des changements géographiques.

#### Travaux réalisés

Les travaux réalisés en 1998 ont porté sur :

- la réalisation d'un module de génération des liens de corrélation entre les bases de données géographiques à mettre à jour, c'est-à-dire de l'ensemble minimal des relations à établir non seulement entre les bases mais aussi à l'intérieur de chacune d'elles, pour permettre une mise à jour complète et cohérente [BONANNI 98], [BADARD, LEMARIÉ 98]. Cette étude a également permis l'amélioration des méthodes d'appariement pour les entités géographiques surfaciques,
- la définition et le développement d'une méthode générique de détection des mises à jour entre deux versions d'une même base de données géographiques, s'appuyant sur des outils d'appariement géométrique et topologique, ainsi que la génération d'un journal des mises à jour intervenues ont été réalisés [BADARD 98f], [BADARD 98g]. Cette étude s'est placée dans le cadre d'une réflexion avec les services techniques, commerciaux et de production de l'IGN et des clients de ce dernier (CERTU, Directions Départementales de l'Équipement, Conseils Généraux,...), afin de définir un processus de fabrication de lots différentiels de mise à jour pour les clients de la BD Carto [BADARD 98c], [BADARD 98d]. Elle a également permis de valider la typologie des évolutions spatio-temporelles que peuvent subir les entités géographiques modélisées dans les bases de données géographiques, définie au cours de cette année, dans le cadre du travail de thèse mené dans cette action de recherche [BADARD 98e], [BADARD 98f],

- le transfert des mises à jour de la BD Topo vers la TOP25. La détection des mises à jour entre deux versions de la BD Topo a été réalisée [LEMARIÉ 98]. Ce test a été effectué sur la feuille d'Angers. En effet, la qualité relativement médiocre de la feuille d'Orange, précédemment choisie et qui était la première feuille BD Topo produite par l'IGN, selon un processus qui n'a d'ailleurs pas été retenu par la suite, nous a amené à changer de jeu-test en cours d'année. De plus, l'inexistence du jeu TOP25 correspondant à la première version de la BD Topo a nécessité de le faire produire, retardant ainsi les travaux concernant cette étude. Ce jeu de données devrait nous être livré d'ici à la fin de l'année 1998, et les liens de corrélation nécessaires à la propagation des mises à jour devraient alors être établis par application du module développé au cours de cette année,
- le transfert des mises à jour de la BD Carto vers ROUTE 500. Les travaux menés au cours de cette année, dans le cadre de la définition de lots différentiels de mise à jour pour la BD Carto [BADARD 98c], [BADARD 98d] ont permis de démarrer ce test sur des jeux de données présentant des niveaux d'abstraction plus éloignés. La détection des mises à jour entre deux versions de la BD Carto a donc été réalisée, et l'établissement des liens de corrélation entre les différentes bases de données sera achevé à la fin de l'année 1998,
- le transfert des mises à jour de la BD Carto vers une base " cliente " (Département du Calvados). De même que précédemment, les travaux menés au cours de cette année concernant la BD Carto ont permis de démarrer ce test sur des jeux de données présentant un certain nombre de modifications apportées par le client. La détection des mises à jour entre deux versions de la BD Carto a donc été réalisée, et l'établissement des liens de corrélation entre les différentes bases de données devrait être achevé à la fin de l'année 1998,
- la continuation de la thèse de Thierry Badard portant sur la " Propagation des mises à jour dans une base de données multi-représentations par analyse des changements géographiques ". L'année 1998 s'est orientée vers l'étude de l'évolution des entités dans le temps. Cet axe de recherche s'est décomposé en l'établissement d'une typologie des différents changements géographiques qui peuvent affecter les phénomènes du monde réel modélisés et en l'étude des mécanismes existants en terme de gestion d'historique aux seins des bases de données [BADARD 98f], [BADARD 98g]. Le croisement de cette typologie avec celle des liens de corrélation, définie l'année précédente, afin de déterminer les règles de propagation des mises à jour dans les bases de données a été ensuite initié, mais il reste à finaliser. Une étude des différents algorithmes de généralisation, notamment du linéaire, a été également entamée, cette année, afin de voir comment il est possible de les adapter pour les intégrer dans le processus générique de mise à jour des bases de données géographiques multi-représentations précédemment établi au cours de cette recherche [BADARD 98a], [BADARD 98b], [BADARD, SPÉRY 98],
- suite aux travaux menés, depuis plusieurs années, en terme d'appariement au laboratoire COGIT [LEMARIÉ, BUCAILLE 98], les bases d'une méthode d'agrégation *a priori*, s'appuyant sur des critères de groupement perceptif et permettant d'améliorer les appariements surfaciques n-m ont été également établies [BADARD 98f].

D'autre part, les contacts déjà établis avec de nombreux partenaires extérieurs, ont été entretenus durant cette année. Une réponse à appel d'offre pour le PSIG du GdR MIS CASSINI a été ainsi effectuée en 1998 et le sous-axe sur le thème de la mise à jour, retenu en 1997, a été reconduit.

La coopération initiée entre la France (METL, IGN) et le Québec (MRN, Université Laval à Québec) sur l'actualisation des données à référence spatiale est toujours en cours. Elle vise à confronter les réflexions menées dans les deux pays, à échanger, à mettre en commun certains moyens et à établir des bases tests pour valider les approches retenues afin de mettre au point un processus générique de propagation et d'intégration des mises à jour dans des bases de données géographiques.

L'organisation d'un séminaire commun sur le thème de la mise à jour est d'ailleurs prévue pour le début de l'année 1999, avec la venue à l'IGN, du professeur Yvan Bédard du Centre de Recherche en Géomatique de l'Université Laval à Québec. La réalisation d'une publication commune pour une revue à portée internationale devrait d'ailleurs voir le jour à cette occasion, concrétisant ainsi cette collaboration.

D'autres échanges ont également été établis au cours de cette année, et notamment avec le laboratoire de bases de données de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), dirigé par le professeur Stefano Spaccapietra. Un séminaire commun IGN/EPFL est notamment organisé pour le mois de novembre 1998. Des premiers contacts avec le Cadastre hollandais ont été également initiés au cours de cette année et devraient se concrétiser en 1999.

## Suites

L'année 1999 devrait porter sur :

- la finalisation des tests liés à la mise en place d'un système de production de lots différentiels de mise à jour pour la BD Carto : cette étude devrait se terminer au tout début de l'année 1999, notamment *via* la confrontation des résultats obtenus par les processus mis en œuvre au laboratoire COGIT et dans les services de production de l'IGN, et la poursuite des discussions menées parallèlement concernant le contenu et le format de ces lots différentiels. Le but étant d'arriver à établir un système final de production de ces outils d'aide à l'intégration des mises à jour dans les bases de données " client ",
- la finalisation du test BD Topo/TOP25 : l'étude commencée sur la propagation des mises à jour BD Topo vers la TOP25 sera achevée. Les mises à jour détectées entre les deux versions BD Topo dans la première partie de l'étude devront être propagées sur la TOP25. L'étude devra montrer quelles sont les mises à jour que l'on peut propager automatiquement et quelles sont celles qui nécessitent une interaction. Enfin, il faudra comparer le coût d'une mise à jour par propagation à celui d'une mise à jour " traditionnelle " d'un produit dérivé,
- la finalisation du test BD Carto/ROUTE 500 : de même que précédemment, ce test entre des jeux de données présentant des niveaux d'abstraction plus " éloignés ", devra être achevé en 1999. Les mises à jour déjà détectées entre les deux versions BD Carto devront être propagées sur ROUTE 500. La part des mises à jour qui pourront être propagées de façon automatique devra, là aussi, être évaluée et une étude du coût d'une telle propagation devra être également menée,



- la finalisation du test BD Carto/Base " client " : ce test entre jeux de données ayant subi des modifications de la part d'un client devra être également achevé en 1999. Les mises à jour détectées entre les deux versions BD Carto devront donc être propagées sur la BD " client ". Une étude sur le maintien de la cohérence et de l'information contenue dans la base " client " après propagation des mises à jour, devra être également réalisée, afin de mesurer la qualité du mécanisme de mise à jour mis au point,
- la fin des travaux de la thèse de T. Badard portant sur la " Propagation des mises à jour dans une base de données multi-représentations par analyse des changements géographiques ". L'année 1999 va donc s'orienter vers la finalisation du croisement des typologies des liens de corrélation et des évolutions spatio-temporelles suivies par les entités géographiques modélisées, établies précédemment au cours de cette recherche, afin de déterminer l'ensemble des règles prenant en compte la nature des entités géographiques manipulées et permettant une propagation des mises à jour cohérente et sans perte d'information. Il est à noter que l'établissement de cette base de règles sera fortement liée aux tests menés en parallèle dans cette action de recherche. Une grande partie de cette année sera également consacrée à la rédaction du mémoire de thèse.

## Publications

[BADARD 98a] T. Badard : *Mise à jour générique des bases de données géographiques : panorama des problèmes et premières investigations*, in Actes des premières Journées de Ré-ingénierie des Systèmes d'Information, RSI'98, Lyon (F), 1 et 2 avril 1998, pp. 109-118, laboratoire COGIT, IGN-SR 980030/S-COM, 1998.

[BADARD 98b] T. Badard : *Premières pistes pour une mise à jour générique des bases de données géographiques*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 69 (1998/3), pp. 25-32, laboratoire COGIT, IGN, 1998.

[BADARD 98c] ] T. Badard : *Extraction de différentiels de mise à jour sur une base de données géographiques à partir de méthodes d'appariement – Test avec la BD Carto sur la zone de Dinan*, rapport technique, laboratoire COGIT, 11 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980013/S-COM, 6 juillet 1998.

[BADARD 98d] T. Badard : *Extraction de différentiels de mise à jour sur une base de données géographiques à partir de méthodes d'appariement – Test avec la BD Carto sur la zone de Dinan*, rapport technique, laboratoire COGIT, 37 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980025/S-COM, 9 septembre 1998.

[BADARD 98e] T. Badard : *Towards a generic updating tool for geographic databases*, in the Proceedings of GIS/LIS'98, Annual Conference and Exposition, Fort Worth, Texas (USA), November 10-12, 12 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980027/S-COM, 1998.

[BADARD 98f] T. Badard : *Extraction des mises à jour dans les BDG. De l'utilisation de méthodes d'appariement*, in Actes des 3èmes journées Cassini, Marne-la-Vallée (F), 26-27 novembre 1998, 22 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980037/S-COM, 1998.

[BADARD 98g] T. Badard : *On the automatic retrieval of updates in geographic databases based on geographic data matching tools*, to appear in the Proceedings of ICA/ACI'99, Ottawa, Canada, August 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR, 1998.

[BADARD, LEMARIÉ 98] T. Badard & C. Lemarié : *Propagating updates between geographic databases with different scales*, to appear in the Proceedings of the 7th National Conference GIS Research UK, GISRUK'99, University of Southampton (UK), April 14-16, 1999, laboratoire COGIT, IGN, 1998.

[BADARD, SPÉRY 98] T. Badard & L. Spéry : *Problèmes liés à l'échange et à l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques*, in Revue Internationale de Géomatique, 18 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980043/S-COM, 1998.

[BONANNI 98] L. Bonanni : *Etablissement de liens de corrélation dans un but de mise à jour des bases de données géographiques*, mémoire de DEA, Systèmes Intelligents, Université Paris-9 Dauphine (F), 65 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980017/S-COM, 29 septembre 1998.

[LEMARIÉ 98] C. Lemarié : *Comparaison de deux versions successives de la BD Topo - Test sur la zone d'Angers*, rapport technique, laboratoire COGIT, 13 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980036/S-COM, 4 mars 1998.

[LEMARIÉ, BUCAILLE 98] C. Lemarié & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, in Actes du 11ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, RFA'98, Clermont-Ferrand (F), 20-22 janvier 1998, vol. 2, pp. 397-406, laboratoire COGIT, IGN-SR 980003/S-COM, 1998.

## C.3.2 Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques

Arnaud de la Losa

### Contexte

Le monde réel dans lequel nous vivons est bel et bien tridimensionnel (trois dimensions spatiales, plus une, si on prend en compte la dimension temporelle).

Cependant, les bases de données géographiques sont toujours gérées en deux dimensions alors que le support informatique n'impose plus les contraintes dimensionnelles du papier. Il en découle alors un certain nombre de problèmes de représentation dus à cette contrainte : pas de faces verticales (pour le bâti, par exemple), pas de superposition d'objets (cas des ponts), pas de volumes (pour les lacs...).

## Objectifs

L'objectif est alors de concevoir un modèle entièrement tridimensionnel pour une représentation enfin correcte de tous les types d'objets géographiques. Ce modèle devra comporter, comme tous les modèles qui s'appliquent aux données géographiques, une partie topologique qui servira à résoudre les requêtes topologiques sans passer par des calculs géométriques, ni par des interminables parcours de listes.

## Activités - résultats

Le modèle choisi est l'exacte extension 3-D [DE LA LOSA 98] du modèle de carte topologique 2-D [DAVID 91] déjà utilisé sur la plate-forme GéO2 du laboratoire COGIT. Le modèle 2-D étant basé sur les brins (équivalents aux couples (arête, nœud final)), son extension 3-D sera alors basée sur les faces orientées ainsi que sur les couples (face non orientée, arc orienté) (en 3-D, l'équivalence n'est pas conservée).

Les relations sur les brins ont pu être étendues en couple suivant avec face invariante, couple suivant avec arc invariant, couple inverse, et face orientée inverse. Ces relations permettent alors de retrouver aisément le contour d'une face, la frontière d'un volume, etc. Il est à noter que les trous sont également gérés (trous surfaciques, trous volumiques - cavités et trous débouchants), ainsi que certaines relations d'inclusion.

Le niveau géométrique a pu être simplifié grâce à la description volumique qui peut dorénavant se passer de la décomposition en tétraèdres. En effet, cette décomposition pouvait être utilisée pour le calcul des volumes, or une autre méthode permet de les calculer en passant par une somme sur les déterminants des coordonnées de chacun des triangles composant le contour du volume (les triangles doivent tous être orientés soit vers l'intérieur, soit vers l'extérieur du volume en question). Ce calcul de volume permet alors d'éviter la conception d'une méthode automatique de décomposition en tétraèdres.

La triangulation des faces permet de gérer au niveau topologique des faces suffisamment complexes. En revanche, la triangulation ne peut pas être calculée automatiquement puisqu'elle dépend du monde réel. Il existe une analogie avec la représentation 2-D : les points qui définissent une ligne complexe en deux dimensions ne peuvent pas être reliés automatiquement.

L'implémentation du modèle a pu être réalisée avec l'aide d'un stagiaire [FLEURY 98] sur le SGBD O2. Les données peuvent être entrées dans la base, puis un menu permet à l'utilisateur d'interroger la base grâce à certaines requêtes topologiques, géométriques et directionnelles simples. Des sorties au format VRML (Virtual Reality Modeling Language) permettent de visualiser les résultats des requêtes, et des liens avec des fichiers HTML dirigent l'utilisateur vers les caractéristiques de l'objet sélectionné graphiquement.

Des tests sont réalisés sur un échantillon de données mettant en jeu des objets 3-D (lac volumique, bâtiments avec parties volumiques et parties ouvertes, ponts, route sous bâtiment, tunnel, surplomb, ligne électrique, etc.). Et grâce à la structure topologique stockée dans la base, n'importe quelle requête topologique, parmi les plus de quatre-vingt recensées, peut être lancée sans effectuer de calculs superflus.

## Suite

Cette année a permis d'améliorer certains points du modèle puis de passer à la phase de validation. Les données rentrées dans la base disposent déjà de toute la structure topologique, il serait donc souhaitable de ne fournir que les données de base pour que le reste (la topologie) soit calculé automatiquement. Il faudra donc définir cet ensemble de base, ainsi que les méthodes de construction automatique de la topologie tridimensionnelle.

Le passage d'une base 3-D à une base 2-D doit également être envisagé. Malgré son caractère rétrograde, cette application trouvera son utilité dans la production de cartes papier (support qui reste encore très utilisé en raison de son caractère pratique).

## Référence

[DAVID 91] Benoît David : *Modélisation, représentation et gestion de l'information géographique, une approche en relationnel étendu*, thèse de doctorat de l'Université de Paris-6, laboratoire COGIT, IGN-SR 910016/S-THE, soutenue le 8 juillet 1991.

## Publications

[DE LA LOSA 98] Arnaud de la Losa : *Towards a 3-D GIS. From 2-D GIS and 3-D CAD, Conception of a 3-D GIS with a Complete Topological Management*, in Proceedings of the 1st International Conférence GIS PlaNET'98, Lisboa (Portugal), september 7-11, laboratoire COGIT, IGN-SR 980021/S-COM, 1998.

[FLEURY 98] David Fleury : *Implémentation d'un modèle géographique 3-D*, rapport de stage DESS-GLA, laboratoire COGIT, IGN-SR 980018/S-STA, 1998.

## C.3.3 Appariement de données géographiques

Cécile Lemarié

### Contexte

L'appariement de données géographiques est une technique complexe consistant à identifier dans des jeux de données différents les entités représentant les mêmes phénomènes du monde réel.

Ce processus est difficile à mettre en place car il fait intervenir un nombre important de techniques et de paramètres qui dépendent fortement de la modélisation de l'information géographique et impliquent également la maîtrise d'aspects cognitifs. Cependant, l'utilisation de ce type d'outils permettrait d'une part de réutiliser de façon optimale des jeux de données déjà existants (intégration de jeux de données de sources diverses, raccordement de jeux de données adjacents) et d'autre part d'optimiser la gestion des jeux de données (contrôle qualité, propagation de mises à jour entre bases de données).

L'IGN, producteur de bases de données géographiques et des produits cartographiques qui en dérivent, a investi énormément, tant sur le plan humain que financier, pour se doter de bases de données géographiques, c'est pourquoi il a grandement besoin d'outils d'appariement efficaces et génériques pour des applications telles que le contrôle qualité, la mise à jour....

C'est donc dans ce contexte que cette action de recherche traitant de l'appariement de bases de données géographiques a débuté en janvier 1998.

### Objectifs

Les objectifs de l'action de recherche sont de :

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

### Travaux réalisés

Cette année, les travaux réalisés ont porté sur :

- la réalisation et le test d'un module d'appariement permettant de déterminer les mises à jour qui ont pu être effectuées entre deux versions successives de la même base de données [BADARD 98a], [BADARD 98b]. Ce module est un premier pas vers le module générique recherché dans le sens où il démontre qu'il est possible de s'affranchir des bases de données,
- les premières spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques ont été définies [LEMARIÉ, BUCAILLE 98],
- une thèse portant sur l'appariement vient de débuter et devrait mener au début de l'année 1999 à une étude bibliographique complète recensant les expériences menées jusqu'alors mais surtout permettant de définir plus précisément les buts de notre étude.

### Suite

L'année 1999 devrait se porter essentiellement sur deux axes distincts :

- la recherche de nouveaux algorithmes : le domaine de la reconnaissance de formes mérite d'être exploré,
- la définition de la structure du module d'appariement : on a défini les grandes lignes du processus, or il reste maintenant à le doter d'un comportement propre dépendant du contexte pour lequel l'appariement est utilisé et du jeu de données. Des indicateurs devront être définis ainsi que le comportement du module en lui-même.

### Publications

[BADARD 98a] T. Badard : *Extraction des mises à jour dans les BDG. De l'utilisation des méthodes d'appariement*, soumission aux troisièmes Journées Cassini, 26-27 novembre 1998, Marne-La-Vallée (F), laboratoire COGIT, IGN-SR 980030/S-COM, 1998.

[BADARD 98b] T. Badard : *On the automatic retrieval of updates in geographic databases based on geographic data matching tools*, ACI'99, laboratoire COGIT, IGN-SR 980039/S-COM, 1998.

## C.3.4 Qualité des bases de données géographiques

François Vaugin

### Contexte - objectifs

Dans la continuité des travaux de recherches sur la qualité des données géographiques vectorielles conduites au laboratoire COGIT, cette action de recherche a pour objectif l'évaluation de la pertinence des métadonnées sur la qualité des données géographiques vectorielles.

En particulier, il s'agit de :

- mieux connaître ce que représentent les indicateurs de qualité usuels, et savoir comment les manipuler,
- mettre à l'épreuve, du point de vue des utilisateurs, l'intérêt et l'utilité des indicateurs de qualité tels que proposés dans les normes (CEN au niveau européen, ISO au niveau international).

Les métadonnées sur la qualité sont décrites de manière détaillée dans le Bulletin d'Information de l'IGN n° 67 (1997). De légères variations peuvent apparaître avec d'autres normes, mais l'essentiel se retrouve dans tous les documents qui traitent de la qualité des données géographiques. Concrètement, les métadonnées sur la qualité sont des listes d'indicateurs qui décrivent chacune des composantes de la qualité (géométrie, sémantique, temporel, généalogie, cohérence logique). Si elles sont fort utiles pour le producteur qui doit s'assurer que les données produites sont conformes aux objectifs, force est de constater qu'elles ne répondent pas aux besoins des utilisateurs. Ceux-ci ont besoin de données qui permettent d'estimer la qualité des résultats qu'ils déduisent des bases de données géographiques, or le mode d'emploi des métadonnées n'est jamais fourni.

Ainsi, l'utilisateur dispose avec ces métadonnées sur la qualité d'informations qu'il ne sait pas forcément interpréter ni manipuler, notamment pour évaluer les résultats qu'il tire des données géographiques. Le but de cette action est de chercher à donner du sens aux informations proposées, et d'évaluer la pertinence de celles-ci.

Dans ces travaux, les composantes sémantiques, géométriques, et de cohérence logique sont l'objet d'un effort particulier. La qualité géométrique a été relativement plus étudiée que les autres composantes de la qualité car elle est plus facilement mathématisable. Une attention spéciale portera sur la qualité sémantique car une meilleure compréhension du comportement de la qualité sémantique répondrait à une forte attente des utilisateurs, comme des producteurs.

### Activités - résultats

Une thèse a été mise en route sur le sujet de cette action de recherche : " pertinence et lisibilité des indicateurs de la qualité ". Olivier Bonin, thésard, a débuté ses travaux en octobre 1997. Cette recherche s'articule en deux parties : étude théorique du problème, et validation par la pratique. Dans un premier temps (huit mois), le travail a consisté en une étude bibliographique portant sur les indicateurs de qualité et les techniques d'analyse de sensibilité. De nombreux tests ont été mis en œuvre dans le domaine de l'analyse de sensibilité sur données vecteur et un article a été présenté à SSDBM'98.

Les résultats des tests ont permis d'orienter l'étude théorique approfondie qui a été menée par la suite pour comprendre la nature d'un certain nombre d'indicateurs de qualité sémantique et leur possible agrégation. Ainsi, des modèles statistiques d'erreurs ont été produits et mis en relation avec les indicateurs existants. Ces modèles sont en cours de développement ; en particulier on s'intéresse à la meilleure façon de les paramétrer en fonction des besoins de l'utilisateur. Ils permettent de résumer les indicateurs de qualité en connaissant la validité des résumés.

Globalement, on peut attendre de ces travaux des avancées majeures sur l'agrégation de métadonnées qualité (" comment résumer une batterie d'indicateurs ? "). Cette question est essentielle car la lisibilité des indicateurs passe par leur simplification, leur synthèse. Il est donc prévu de fonder le " mode d'emploi " des indicateurs sur ces modèles d'agrégation que l'on aura validés par des tests pratiques.

Cette étude théorique se conclura par une analyse critique des indicateurs existants : redondance et lacunes seront identifiées à la lumière des connaissances acquises.

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

Ainsi, une étude sur la résolution de la BD Carto a été conduite. Constatant que les coordonnées des objets de la base de données cartographiques sont inutilement trop précises (décimales superflues), il s'agissait de chercher une solution simple qui permette de mettre en accord la résolution des coordonnées des objets avec la résolution effective de la base de données. Une solution " simpliste " est de faire un arrondi des coordonnées, ce qui permet de réduire le volume des données et d'éviter que l'utilisateur n'accorde trop de confiance à des décimales non significatives. L'impact de ce type d'arrondi a été étudié afin de mieux connaître la façon dont des conflits géométriques, topologiques, ou avec des spécifications peuvent apparaître à l'intérieur d'une couche ou entre couches, et en quelle quantité. Un premier prototype a été implémenté sous ArcInfo. Il permet une résolution automatique des situations sans problèmes, une détection automatique des conflits, et des corrections interactives.

Par ailleurs, une collaboration avec Susanna McMaster, spécialisée dans les techniques d'analyse de sensibilité, a été menée à bien au printemps 1998. Il en est ressorti un article destiné à publication dans une revue internationale avec *referee*.

Par ailleurs, un projet de collaboration a été constitué avec l'Université Polytechnique d'Hongkong pour mener une recherche commune sur la qualité des données, ce qui se traduira par un article commun entre les équipes françaises et d'Hongkong, un échange réciproque de chercheurs, et la participation de chercheurs du laboratoire COGIT au Comité d'organisation d'un congrès sur la qualité organisé à Hongkong sur le modèle du congrès Cassini'97. Ce projet, dont l'acceptation finale n'est pas encore acquise, sera intégralement financé par un fond de collaboration scientifique France-HongKong.

D'autres projets de collaboration sont en cours d'élaboration ; ainsi une visite de Kate Beard au laboratoire COGIT est envisagée, ce qui pourrait être l'occasion de travailler sur les questions de liens entre qualité géométrique et topologie. De même, le chercheur anglais Michael Worboys est venu en novembre 1998, ce qui a été l'occasion d'échanges fructueux. L'accord est déjà acquis avec M. Worboys sur les dates.

## Suites

Par la suite, l'agrégation des indicateurs de qualité permettra d'engager des tests pratiques pour établir le comportement des valeurs "résumantes" et de savoir si elles sont suffisantes pour que l'utilisateur évalue la qualité des données et leur adéquation à ses besoins. On se rapprochera ainsi de l'objectif de cet axe : mieux comprendre la pertinence des indicateurs de qualité et savoir comment les manipuler.

Enfin, l'étude sur la qualité des données géométriques surfaciques n'a pu être engagée comme prévu cette année, car la thèse d'Atef Bel Hadj Ali a été repoussée d'un an pour des raisons administratives, mais elle a débuté fin novembre 1998. Sur un thème proche, un article approfondissant les problèmes soulevés par l'appariement multiple est engagé avec l'action de recherche sur l'appariement.

## Publications

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

[HARVEY et al 98] Francis Harvey, François Vauglin & Atef Bel Hadj Ali : *Geometric Matching of Areas*, 8th International Symposium on Spatial Data handling, Tom Poiker, Nicholas Chrisman, International geographical Union (Eds), Vancouver (Canada), 11-15 July 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980035/S-COM, 1998.

[VAUGIN, BEL HADJ ALI 98] François Vauglin & Atef Bel Hadj Ali : *Geometric Matching of Polygonal Surfaces in GISs*, ASPRS-RTI Annual Conference, Tampa (USA), pp. 1511-1516, March 30 - April 3, laboratoire COGIT, IGN-SR 980032/S-COM, 1998.

[VAUGLIN 98a] François Vauglin : *Qualité des bases de données géographiques*, Journées Recherche de l'IGN, Saint-Mandé (F), 4-5 mai 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980026/S-COM, 1998.

[VAUGLIN 98b] François Vauglin : *Statistical Representation of Relative Positional Uncertainty for Geographical Linear Features*, Data Quality in Geographic Information - From Error to Uncertainty, Michael Goodchild & Robert Jeansoulin (Eds), livre publié par Hermès, pp. 87-96, Paris, laboratoire COGIT, IGN-SR 980028/S-LIV, 1997.

[VAUGLIN 98c] François Vauglin : *Use of Variograms to Represent Spatial Uncertainty for Geographic Linear Features*, Third International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Québec (Canada), 20-22 mai 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980034/S-COM, 1998.

## C.3.5 Interopérabilité

François Chirié et Bénédicte Bucher

### Contexte - objectifs

L'interopérabilité dans le domaine de l'information géographique est une situation idéale où données et traitements seraient accessibles, sur un réseau comme Internet, et où il serait possible de les faire travailler ensemble, c'est-à-dire d'appliquer les traitements sur les données pertinentes, et de combiner éventuellement les traitements. Cela se situe dans un problème plus général : celui de l'échange d'informations, qu'il s'agisse de données ou de savoir-faire, cet échange pouvant être entre un producteur de données et un utilisateur, entre un traitement et un autre. L'interopérabilité renvoie au rôle joué dans cet échange par les méthodes et outils, conceptuels et informatiques, utilisés pour formaliser et gérer ces informations.

Les obstacles à l'interopérabilité peuvent ainsi être des incompatibilités à des niveaux divers des systèmes concernés : les formats, les modes de stockage, et les modes d'accès. Ce sont les obstacles les plus évidents et qui sont souvent à l'origine des démarches dans ce domaine.

Par ailleurs, derrière toute base de données, tout processus, et tout besoin, se trouvent des acteurs qui appartiennent à des communautés d'utilisateurs différentes. Or, à une communauté d'utilisateurs correspond un contexte précis de manipulation des données. Concrètement, dans le cas de fournisseurs de données, les schémas conceptuels de données, les nomenclatures, les sources et spécifications de saisie et de contenu peuvent être extrêmement variés. D'autre part, certaines informations qui nécessiteraient d'être considérées peuvent ne pas être exprimées explicitement. Tout cela conduit à la notion d'interopérabilité sémantique qui est cruciale lors de l'accès et l'exploitation de bases de données où il est important de prendre en compte les besoins et comportements des utilisateurs.

Notre action de recherche s'inscrit dans les démarches en interopérabilité sémantique, son objectif est d'étudier les modalités d'accès aux bases de données géographiques dans ce contexte.

## Activités - résultats

L'année 1998 a permis d'établir un état de l'art des différentes démarches en interopérabilité et de définir à partir de cet état de l'art le sujet de thèse de Bénédicte Schietecatte-Bucher. Cette question concerne différents acteurs : des producteurs et des utilisateurs de données géographiques, des concepteurs ou des vendeurs de logiciels, des institutions, des promoteurs de technologies, des universitaires.... Elle est traitée par différentes approches.

Le problème de l'interopérabilité entre des SIG et des bases de données a ainsi conduit à l'utilisation de standards de fait, les formats d'échange des principaux SIG, puis à la définition de normes institutionnelles (ISO/TC211 et CEN/TC287). L'OpenGIS Consortium tente d'apporter une solution à ce problème sous la forme de spécifications d'implémentation d'interfaces entre SIG.

Des infrastructures d'information sont par ailleurs mises en place, suite au développement de réseaux de communication comme Internet. Cela pose le problème de l'accès d'un utilisateur à cette information. Il ne peut évaluer chaque ressource, il lui faut un niveau plus global auquel il puisse prendre connaissance de l'information existante voire exprimer une requête. Cela est rendu possible par la méta-information, ou information sur l'information, qui comporte des informations utiles sur la ressource dispensant dans un premier temps de considérer celle-ci dans son intégralité. Ainsi on renseigne les données à l'aide de métadonnées portant par exemple sur leur propriétaire, leurs modalités d'acquisition, leur qualité et leur contenu. Des systèmes peuvent éventuellement gérer des requêtes de recherche d'information en consultant ces méta-informations. Pour cela, il faut que ces dernières aient une forme suffisamment homogène. Des travaux sont en cours pour élaborer des standards en la matière et pour enrichir les structures de métadonnées de façon à permettre l'expression de requêtes complexes.

Le problème de l'accès aux bases de données n'est pas uniquement celui de l'accès physique, mais plus généralement celui de la compréhension de l'information qu'il est possible d'extraire d'une base de donnée particulière, du choix éventuel d'une base de données, parmi plusieurs pour effectuer une tâche, de la sélection dans cette base de donnée de l'information utile dans le cadre de la tâche et de l'expression d'une requête.

Les principaux problèmes rencontrés sont liés à des différences de perceptions et de modélisations. Il n'existe pas de description naturelle de l'information géographique partagée par tous, et d'autre part, deux utilisateurs ayant une même vision du monde réel peuvent l'avoir modélisé différemment dans leurs applications respectives. L'hétérogénéité sémantique provient des disparités entre catégorisations géographiques. La correspondance entre le monde réel et les concepts cognitifs construits par l'homme varie en fonction de la culture, de la langue, et de la discipline. Par exemple, les définitions des catégories géographiques, les frontières entre différentes catégories ne sont pas les mêmes pour tous.

La thèse de Bénédicte Schietecatte-Bucher doit étudier l'amélioration de l'"accessibilité" des bases de données géographiques en contribuant à la conception d'un système d'interaction entre l'utilisateur et les bases de données.

Pour cela, nous cherchons à créer une description supplémentaire de nos données par l'utilisation qui en est faite. Cette description doit aider l'utilisateur à exprimer son besoin en termes de fonctionnalités et guider le choix des données et traitements appropriés. Formellement, nous cherchons à identifier et représenter des tâches génériques, c'est-à-dire communes à plusieurs domaines d'application, et à les exprimer en termes d'opérateurs plus élémentaires. Pour cela nous nous appuyons sur des utilisations typiques de l'information géographique dans des domaines différents. Une méthode d'analyse de scénarios cognitifs d'utilisation de cette information a été établie dans ce but, et des premières tâches et les opérateurs correspondants ont été déterminés.

## Suites

Deux pistes complémentaires vont être suivies :

- d'une part, nous allons poursuivre la détermination des tâches génériques, celle de la décomposition en opérateurs, et l'organisation de ces derniers en ontologie. Cette démarche sera appuyée et validée par des contacts avec la direction commerciale de l'IGN et des utilisateurs des données de l'IGN. Un projet du PNSIG en collaboration avec le CERTU, la CEGN et le LALIC, laboratoire en acquisition de connaissances, doit concourir à ces études ; il existe un projet de détermination d'opérateurs élémentaires d'analyse spatiale dans les SIG : "Virtual GIS", mené par Jochen Albrecht à l'Institut ISPA [ALBRECHT 95]. Nous chercherons à traduire nos opérateurs "utilisateurs" dans ces opérateurs SIG,
- d'autre part, un test d'implémentation de résultats obtenus dans le domaine de l'interopérabilité sémantique par les thèses de Thomas Devogele [DEVOGELE 97] et Yaser Bishr [BISHR 97] sera effectué sur le thème routier des bases de données IGN. Ce test permettra d'aborder l'intégration et le partage de données entre bases de données distribuées hétérogènes.

## Références

[ALBRECHT 95] Jochen Albrecht : *Universal analytical GIS operations*, Ph. D. dissertation, University of Vechta, Allemagne, 1995.

[BISHR 97] Yaser Bishr : *Semantic aspects of interoperable GIS*, Ph. D. dissertation, ITC, Enschede (NL), 1997.

[DEVOGELE 97] Thomas Devogele : *Processus d'intégration et d'appariement de bases de données géographiques, application à une base de données routières multi-échelles*, thèse de méthodes informatiques, laboratoire COGIT, IGN-SR 970025/S-THE, 1997.

### C.3.6 Généralisation du linéaire et modélisation par l'équation intrinsèque

Jean-Georges Affholder

Notre proposition de recherche pour l'année 1998 accordait une place assez importante à la notion de bibliothèque de formes élémentaires, notion liée à une approche matricielle et discrète.

Au cours de l'année écoulée, nos travaux nous ont amené à modifier quelque peu notre point de vue. L'amélioration de la modélisation analytique qui repose essentiellement sur notre généralisation de la notion de rayon de courbure à une polygonale et, de façon plus générale, sur des algorithmes de passage d'une polygonale à une courbe ayant en chaque point une tangente continue (courbe de classe C1) nous permettra sans doute de nous affranchir des bibliothèques de forme et de l'approche matricielle, au profit des bibliothèques de séquences.

Plus précisément, après être passé de la polygonale initiale à une courbe de classe C1, nous modélisons cette courbe par son équation intrinsèque.

Ainsi, ce que nous avons appelé antérieurement objet élémentaire (partie de la courbe comprise entre deux points d'inflexion) pourra être représenté, dans les cas les plus simples par une séquence du type :

0	C1	s1
C2	C2	s2
C3	0	s3

Explications : nous avons ici affaire à un virage où la courbure croît de 0 à C1 sur une longueur s1 ; cet arc de clothoïde se raccorde à un arc de cercle de longueur s2 et de rayon  $R = 1/C2$ , arc de cercle qui lui-même se raccorde à un arc de clothoïde où la courbure décroît de C3 à 0 sur une longueur s3.

Dans un cas un plus complexe (zones rectilignes aux deux extrémités ; deux ou plusieurs maxima de courbure entre deux points d'inflexion), nous aurions une séquence de type :

0	0	s1
0	C2	s2
C3	C3	s3
0	0	s4
C5	C5	s5
C6	0	s6
0	0	s7

Remarquons que notre courbe n'est pas de classe C2. Remarquons aussi que cette modélisation permet une certaine compression de l'information. Signalons enfin, que pour des raisons dont l'exposé sortirait du cadre du présent bulletin, nous avons été amené à remplacer la clothoïde par une courbe où la courbure est fonction linéaire non plus de l'abscisse curviligne, mais de sa racine carrée.

Pour revenir à notre but final, nous pensons que cette modélisation se prête bien à l'élaboration d'algorithmes de généralisation, et en particulier, d'algorithmes de suppression, de fusion et de caricature de virages.

Cette modélisation nous permettra-t-elle de faire l'économie de la constitution de bibliothèques de séquences ? Répondre à cette question nous paraît prématuré.

Nous continuons à penser que l'on ne peut plus espérer de résultats importants tant que l'on ne dispose pas de jeux d'essai suffisamment étoffés pour pouvoir réaliser une étude statistique. La description de ces jeux d'essai se trouve dans notre document : " la généralisation du linéaire : une approche nouvelle ".

Rappelons qu'il s'agit de la totalité du routier pour les extraits de la BD Carto correspondant aux feuilles de Valence, de LaJavie et de Nice, et évidemment ses zones équivalentes de la série verte. Il y aura donc un travail de scannage, de vectorisation et de structuration des données.

Nous disposons d'un algorithme trivial, mais efficace, de segmentation d'une polygonale en tronçons, le tronçon étant, pour l'échelle de départ (tronçon initial), la plus petite partie d'un arc de routier dont la généralisation puisse être envisagée indépendamment du reste de l'arc, et pour les autres échelles, l'homologue d'un tronçon initial, autrement dit le résultat de la généralisation de ce tronçon.

Comme nous venons de voir, nous disposons d'un bon algorithme de modélisation de ces tronçons. L'appariement automatique ou interactif des tronçons homologues ne devrait pas poser de difficultés. Il restera à développer la notion de séquences voisines.

De façon un peu plus précise :

Un tronçon " ancien " et sa généralisation seront représentés en bibliothèque respectivement par une séquence  $f_1f_2\dots f_n$  et une séquence  $F_1F_2\dots F_m$  (en général  $m < n$ ), les  $f_i$  et les  $F_i$  étant eux-mêmes des séquences de type  $C_{i1} C_{i2}$  si, définis ci-dessus, l'un des  $C_{i1}$ ,  $C_{i2}$  étant nul, s'ils ne sont pas égaux.

Si l'on veut généraliser un tronçon nouveau  $g_1g_2\dots g_n$ , on cherchera en bibliothèque, dans un premier temps, des tronçons dont la répartition spatiale des maximums de courbure est voisine. Les homologues de ces tronçons fourniront une approximation de la solution cherchée. On passera à la solution définitive selon des règles qui seront définies ultérieurement

### C.3.7 Généralisation de réseau - application au réseau routier

*Emmanuel Fritsch*

#### Contexte

Cette recherche porte sur la généralisation des réseaux, et plus particulièrement du réseau routier. Le thème routier a été privilégié ses dernières années dans les recherches du laboratoire COGIT, et ce pour plusieurs raisons : d'une part le thème routier occupe une part importante du volume des données saisies dans les bases de données et des objets représentés sur une carte. D'autre part, les tracés routiers obéissent à un ensemble varié de contraintes, offrant ainsi en réduction un condensé des difficultés de la généralisation.

Aussi, à côté d'un effort sur le développement d'algorithmes simples spécifiques au routier, (algorithme de lissage et de caricature des lignes isolées et déplacement de routes contiguës) le laboratoire COGIT se dirige-t-il vers des méthodes de prise en compte simultanée de plusieurs contraintes. Le champ d'étude reste le réseau routier, mais les méthodes testées pourraient être ensuite étendues à d'autres thèmes.

#### Réalisations - résultats

Après des recherches sur les traitements géométriques, la recherche sur la généralisation de réseau s'est penchée en 1998 sur la sélection. En dehors du réseau urbain, où l'interaction avec le bâti est complexe et fait l'objet d'études par ailleurs (cf. article C.3.8) les fonctions de dessertes du réseau sont assez faciles à relier aux autres informations de la carte : on définit un certain nombre de points (villages ou curiosités touristiques) qui doivent être desservis par le réseau, et ce de manière optimale.

L'optimalité de la desserte peut s'évaluer par des mesures de plus court chemin, mais la qualité d'une sélection sur le réseau routier ne se résume pas à cela : le réseau doit obéir à des impératifs de lisibilité, de continuité des routes classées, de densité...

Une analyse de ces contraintes a permis de définir deux types de sélection : une part, la sélection de trajet qui nous fait décider que deux points attracteurs doivent être reliés directement par un trajet, et, d'autre part, le traitement des zones de convergence (les carrefours, mais aussi parfois des zones plus étendues, de forte densité d'arcs routiers) sur lesquels plusieurs trajets sont localement possibles, avec des chemins de longueurs comparables.

Le premier cas est de loin le plus courant. Le second pose plus de problème, car le traitement algorithmique approprié ne passe pas toujours par une simple sélection des arcs : il peut aussi nécessiter la fusion des nœuds. Ainsi la suppression d'un rond-point ou d'un échangeur complexe réclame-t-elle parfois la création de nouveaux nœuds. En outre, les zones de convergence de route obligent à gérer un grand nombre de contraintes. Alors que, pour la sélection des trajets longs la contrainte de desserte est prépondérante, pour les zones de raccords, les contraintes sont bien plus achevées : alignements, sémantique (gabarit et statut de la route), géométrie propre, et bien sûr fonction de desserte.

La recherche en généralisation est familière de ces imbrications de contraintes qui rendent fragiles toutes les tentatives de programmation séquentielle : le grand nombre de cas rencontrés, la gestion des exceptions pléthoriques et qui, résolues, soulèvent de nouvelles, l'impossibilité de garantir à chaque étape un traitement sans effet de bord qui ferait naître de nouveaux conflits.

Afin de mettre en place un processus de sélection plus robuste, nous avons décidé de recourir à une approche concurrentielle, inspirée des techniques multi-agents. Cette technique a déjà été utilisée au laboratoire COGIT lors d'un stage, avec une fonction de desserte modélisée par l'utilisation d'agents se déplaçant sur le réseau. L'approche que nous avons adoptée considère chaque tronçon de route comme un agent, en concurrence avec les autres pour la sélection. La circulation est modélisée comme un fluide, émis par les points attracteurs et que les tronçons font circuler.

À chaque étape du processus, on calcule la répartition des flux dans les divers tronçons, et l'on renforce (respectivement : affaiblit) les tronçons les plus fréquentés (respectivement : les moins fréquentés). Ce processus de renforcement/affaiblissement porte sur un coefficient de possibilité de sélection inspiré des logiques non-modales (coefficient de présence). Ce coefficient rétroagit sur le processus, puisque plus un tronçon est faible, moins il a la faculté d'attirer le flux du trafic. Parmi les intérêts que présentent cette méthode, on espère permettre l'intégration d'autres contraintes dans le processus de renforcement/affaiblissement.



Le modèle est en cours d'intégration sur la plate-forme Plage, et n'a pas subi pour le moment de contrôle visuel. L'étude des coefficients de présence montre une bonne divergence des valeurs à partir d'une distribution uniforme et centrée, mais on ne note pas l'apparition de deux clusters distincts qui permettraient de signer une sélection/élimination.

## Suite

Après intégration dans la plate-forme Plage du programme de sélection déjà développé, nous prévoyons, tout d'abord, une phase d'expérimentation et d'amélioration de la méthode de calcul des flux, l'objectif idéal étant d'obtenir une coupure nette dans le processus de sélection.

Afin d'enrichir le modèle de sélection, il est prévu de lui intégrer des contraintes cartographiques autres que les contraintes de desserte. Les plus importantes sont naturellement les contraintes géométriques, mais l'on pourra sans doute commencer par les contraintes sémantiques, plus simples à prendre en compte.

Les contraintes géométriques nécessiteront un travail d'analyse, nécessaire à la détection préalable, des caractères que la sélection doit préserver dans le réseau. Il faudra pour cela s'appuyer sur les travaux portant sur les mesures. Outre les tâches de sélection, l'amélioration de la lisibilité du réseau routier nécessite la mise en œuvre de déplacements. Ces déplacements ont fait l'objet d'études par ailleurs, et ces travaux seront approfondis sur la plate-forme.

## Références

- [MUSTIÈRE 97a] S. Mustière : *Dilatation/Fermeture d'une polyligne - principe des algorithmes*, laboratoire COGIT, IGN-SR 970049/S-RAP, 1997.
- [MUSTIÈRE 97b] S. Mustière : *Tests des algorithmes de PlaGe*, rapport technique, IGN/OEEPE, laboratoire COGIT, IGN-SR 970050/S-RAP, 1997.
- [PLAZANET 96] C. Plazanet : *Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique (application aux routes)*, thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 960017/S-THE, 1996.
- [MORISSET, RUAS 97] B. Morrisset & A. Ruas : *Simulation and Agent Modelling for Road Selection in Generalisation*, ICC'97, in Proceedings, vol. 3, pp. 1376-1380, laboratoire COGIT, IGN-SR 970015/S-COM, 1997.

## Publications

- [FRITSCH 96] E. Fritsch : *A mechanical approach for line generalisation*, GISRUK'96, in Proceedings, pp. 49-55, laboratoire COGIT, IGN-SR 960050/S-COM, avril 1996.
- [FRITSCH 96] E. Fritsch : *Caricature des virages par lissage de la courbure*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 69, 1996.
- [FRITSCH 97] E. Fritsch : *Modélisation du linéaire pour le développement d'algorithmes de généralisation du routier*, thèse de l'Université de Marne-la-Vallée, Spécialité SIG, laboratoire COGIT, IGN-SR 960008/S-THE, 2 décembre 1997.
- [FRITSCH, LAGRANGE 95] E. Fritsch & J.-P. Lagrange : *Spectral representation of linear features for generalisation*, COSIT'95, A. Frank & W. Kuhn (Eds), Springer 1995, in Proceedings, pp. 157-172, laboratoire COGIT, IGN-SR 950037/S-COM, 1995.

## C.3.8 Généralisation contextuelle

Anne Ruas et Jean-François Hangouët

### Contexte - objectifs

La généralisation cartographique est fondamentalement contextuelle : les composants de la carte sont redessinés en fonction de leur participation au paysage géographique de la zone considérée.

Après quelques travaux sur la généralisation indépendante (notamment des objets linéaires, avec les thèses de Corinne Plazanet en 1996 et d'Emmanuel Fritsch en 1998, mais aussi des bâtiments avec le mémoire de DEA de Sylvain Damour en 1994), le laboratoire COGIT se consacre désormais essentiellement aux recherches sur l'automatisation de la généralisation contextuelle.

Il y a eu les recherches sur la généralisation de l'orographie (thèse de Pascale Monier en 1997) et les recherches particulières sur la généralisation des zones urbaines ; il y a les recherches particulières sur la généralisation des réseaux routiers, les recherches sur l'élaboration de règles de généralisation pour employer des algorithmes adaptés aux situations, et les recherches (celles qui seront décrites ici), sur les regroupements et traitements d'objets séparés dans la base mais qui participent à un même phénomène géographique sur le terrain, et sur les stratégies d'orchestration des outils et connaissances pour le déroulement d'une généralisation.

Afin de réaliser nos recherches, deux plates-formes expérimentales ont été développées au laboratoire au cours des années précédentes :

- PlaGe est une plate-forme procédurale codée en ADA et Motif, dont l'objectif est de tester et de concevoir des algorithmes permettant la généralisation de données linéaires, essentiellement routières. Cette plate-forme comporte actuellement de nombreux algorithmes de généralisation ainsi que des outils d'analyse qui permettent de travailler sur l'adéquation entre une route (forme conflit) et l'algorithme le plus adapté,
- Stratège est un système expert orienté-objet qui utilise LISP comme langage de programmation. Son objectif est la généralisation de données urbaines (BD Topo). Pour cela, les études ont porté sur une modélisation bien plus riche de l'information géographique qui permet de décrire les contraintes liées à chaque processus de généralisation à différents niveaux d'analyse. Des algorithmes de sélection du réseau de rues, de sélection de bâtiments et de déplacement ont pu être conçus.

Le passage d'une base de données géographiques ou topographiques à une carte de qualité acceptable, nécessite la généralisation, interactive ou automatique.

L'automatisation totale de la rédaction cartographique à partir de la base de données, en fonction des seules spécifications de produit final, est sans nul doute utopique : les objectifs en production sont de disposer de larges palettes d'outils automatiques qui sachent reconnaître des groupes géographiques et proposer des transformations (contextualité) mais aussi de soulager l'opérateur cartographe du choix entre les divers outils applicables (stratégie).

Plus particulièrement pour la production à l'IGN, l'objectif est la dérivation automatisée de cartes ou de bases de données à partir des bases de données de référence (BD Topo, BD Carto, Georoute, etc) en fonction de chaque spécification client. Le premier client de l'IGN étant l'IGN, il s'agira donc d'automatiser la production de produits-clés, tels que les 1 : 25 000 et 1 : 100 000.

Notre objectif principal est d'identifier les mécanismes permettant la prise en compte de spécifications diverses afin de réaliser, à des coûts réduits, des produits correspondant à ceux qui sont identifiés par le département marketing de l'IGN et de concevoir des outils permettant des dérivations multiples, simples et efficaces des données IGN.

Les progrès que nous avons réalisés en compréhension du processus, en modélisation et en algorithmie nous ont permis de concevoir un modèle de généralisation qui sert de base à la conception d'un nouveau SIG orienté-objet dans le cadre du projet européen AGENT. Ce modèle est sommairement décrit ci-dessous.

## **Activités - résultats**

### *Orographie*

Faute de moyens, la généralisation de l'orographie n'a pas été traitée en 1998.

### *Aspects stratégiques de la généralisation*

Les recherches en stratégie de généralisation reposent sur un ensemble de concepts qui seront décrits dans la thèse d'Anne Ruas (1999). Nous ne décrivons ici que quelques principes illustrés dans les figures C.3.8.1 et C.3.8.2.

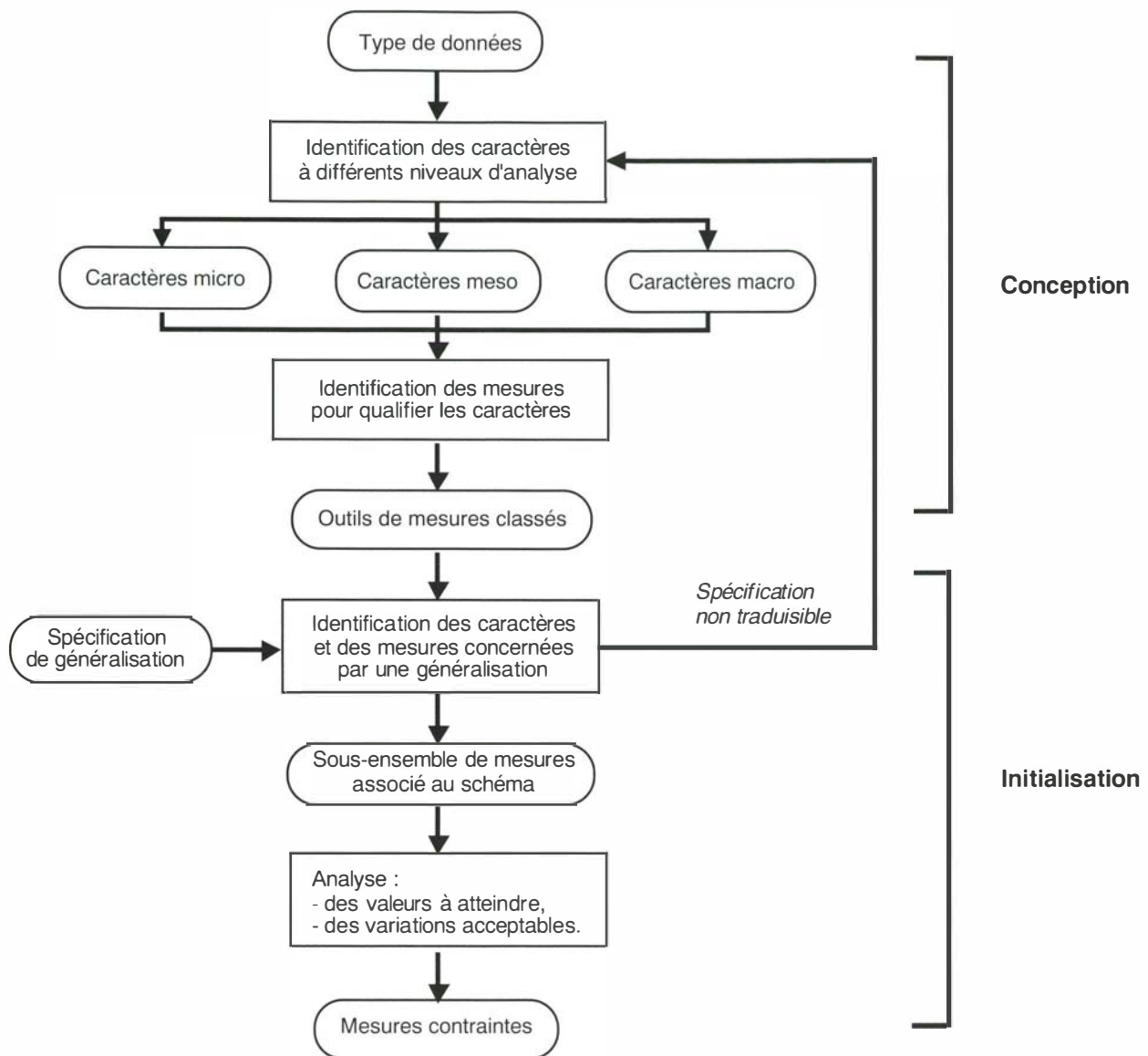
L'automatisation du processus de généralisation impose que le système puisse reconnaître les entités qui nécessitent une généralisation. La nécessité de généralisation dépend d'informations de contrôle qui sont introduites au début du processus, telles que le thème de la carte, l'échelle finale (dans le cas d'une carte) les quantités de réduction requises, etc. Ces informations doivent être traduites sur les données géographiques qui décriront leurs insatisfactions.

La traduction des spécifications de généralisation requiert une identification des caractères qui porteront des contraintes à respecter.

Ces caractères (forme, taille, position, densité, alignement, quantité d'information, etc,...) existent à différents niveaux d'analyse que nous appelons :

- micro : lorsqu'ils sont portés sur un objet initial ou une partie d'objet (une maison, par exemple),
- méso : lorsqu'ils reposent sur un groupe d'objets (un quartier, par exemple),
- macro : lorsqu'ils reposent sur une population d'objets (toutes les routes, par exemple).

En phase de recherche, nous identifions les caractères importants pour un processus de généralisation, les méthodes et mesures nécessaires pour décrire ces caractères et les façons de contraindre ces caractères en fonction des spécifications de chaque généralisation. La figure C.3.8.1 résume le processus d'identification des caractères et des contraintes portées par ces caractères.



**figure C.3.8.1** : identification des caractères et des contraintes à différents niveaux d'analyse [RUAS 98]. La démarche proposée repose sur l'autonomie décisionnelle des entités géographiques. L'espace géographique est ainsi constitué d'un ensemble d'objets, appelés situations, défini à différents niveaux d'analyse.

Ces situations sont capables de s'auto-analyser en consultant les violations de contraintes portées par leurs caractères. Chaque caractère contraint est une entité qui dispose de méthodes pour analyser l'écart entre son état courant et son état idéal.

Les contraintes étant de nature hétérogène, les situations consultent leur degré d'insatisfaction ainsi que leur priorité relative afin de décider de la meilleure contrainte à résoudre à un instant donné ainsi que de la meilleure opération de généralisation à réaliser. Les contraintes instanciées fournissent à leur situation des propositions ordonnées de traitement afin de faciliter les choix algorithmiques.

La généralisation d'une situation géographique est une démarche progressive, les contraintes étant progressivement respectées par l'usage contrôlé d'algorithmes de généralisation.

Selon la nature des situations, des contraintes non respectées et des connaissances procédurales, la stratégie de généralisation peut être stochastique ou déterministe. Chaque opération réalisée est contrôlée par la situation en évaluant l'amélioration ou la détérioration de l'état de ses contraintes. La figure C.3.8.2 résume ce processus.

Ce processus de généralisation repose sur un enrichissement considérable de la description de l'espace géographique notamment par l'identification des phénomènes géographiques du niveau méso (voir plus loin). La modélisation des données a été expérimentée sur Stratège dans le cadre de la généralisation de données urbaines et est en cours d'implémentation sur la plate-forme LAMPS2 dans le cadre du projet AGENT.

La dynamique du système a fait également l'objet de nombreux développements sur Stratège (notamment les relations entre contraintes et situations) et nécessite davantage de recherche pour les mécanismes décisionnels entre les niveaux micro et méso et pour l'apprentissage dynamique.

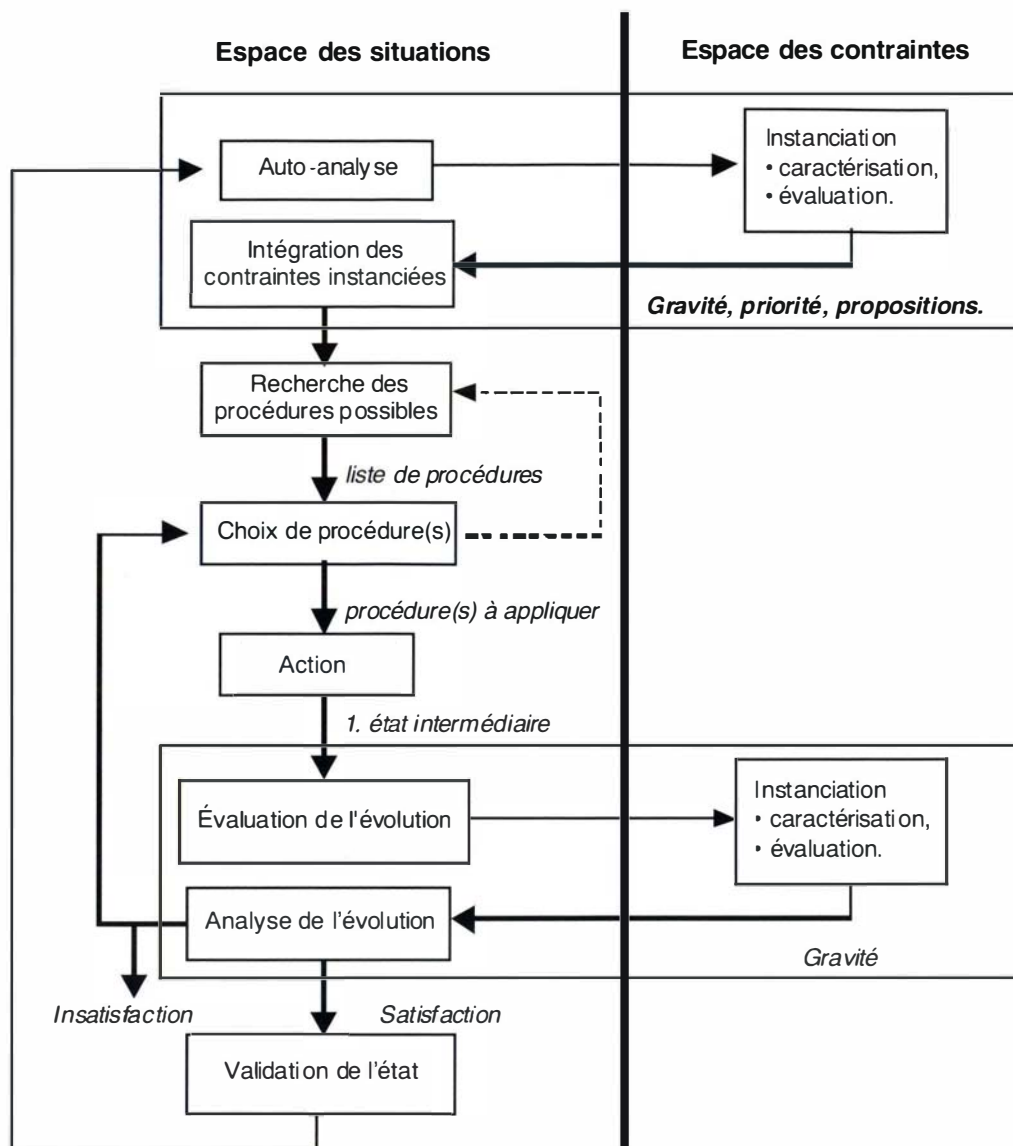


figure C.3.8.2 : prise en compte des contraintes pour le choix des procédures de généralisation

## Modélisation Multi-AGENT

La démarche exposée ci-dessus a fait l'objet d'une implémentation expérimentale sur la plate-forme LAMPS2 de Laser-Scan dans le cadre du projet AGENT.

Cette implémentation a été réalisée par Stéphanie Closmenil lors d'un stage de DESS [CLOSMENIL 98]. L'objectif était d'étudier les difficultés de traduction du modèle à base de contraintes et d'Agent sur cette nouvelle plate-forme. Cette étude sert de base à la conception du modèle dans le cadre du projet.

## Constitution et traitement des Groupements méso : approches gestaltique et phénoménologique

Deux thèses de doctorat ont été achevées en 1998, portant chacune sur la généralisation contextuelle de données urbaines.

La thèse de Nicolas Regnaud [REGNAULD 98] a été consacrée à une approche gestaltique : les bâtiments sont regroupés par des méthodes qui émulent la perception visuelle du cartographe qui travaille sur sa carte et qui y voit spontanément des groupements d'objets.

La thèse de Jean-François Hangouët [HANGOUËT 98] a été consacrée à une approche phénoménologique : les bâtiments sont regroupés selon leur appartenance au même tronçon de rue qui les dessert. Chaque thèse consacre des paragraphes voire des chapitres à l'épistémologie de la science cartographique pour éclairer la pertinence des approches retenues, et contribue ainsi à la compréhension de l'activité elle-même d'automatisation de la généralisation.

Chaque approche nécessite une structure qui permet l'analyse de l'espace vide entre les objets de telle sorte à les grouper puis à les ordonner dans leur groupe (c'est-à-dire à identifier les bâtiments voisins de chaque bâtiment). L'approche gestaltique calcule ainsi un Arbre Recouvrant Minimal sur les bâtiments (arbre qui joint les bâtis sans cycle, et dont la somme des longueurs des arêtes est minimale, cf. figure C.3.8.3). C'est une structure, dont Zahn a démontré en 1971, l'affinité profonde avec les groupements perceptuels).

L'approche phénoménologique utilise un diagramme de Voronoï novateur en ce sens qu'il est calculé non sur des points, mais sur les segments qui composent les polygones qui représentent la géométrie des objets de la base (figure C.3.8.4). Ce diagramme de Voronoï est ainsi le dual exact de la géométrie des objets et permet de mesurer les configurations sans a priori ni biais.

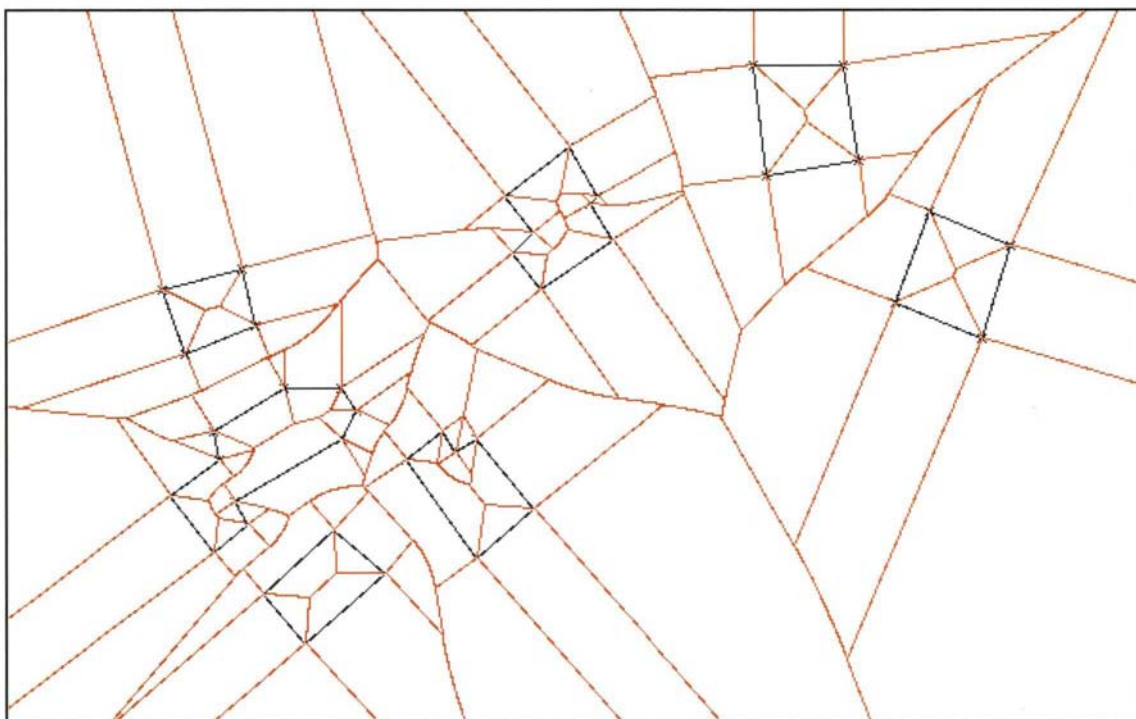
Les bâtiments ne sont pas seulement groupés sur des critères de proximité et de voisinage, chacun est ensuite mesuré pour ses tailles, forme et orientation absolue relatives dans le groupe (approche gestaltique), et aussi pour ses distances minimale et maximale à la route et pour son orientation sur celle-ci (approche phénoménologique).

Des algorithmes de généralisation des groupes ont été programmés : un algorithme de structuration, dans l'approche gestaltique, et un algorithme de typification, dans l'approche phénoménologique. Le but des deux algorithmes est le même : étant donné un groupe d'objets trop dense pour être représenté tel quel à la nouvelle échelle, en sélectionner certains (parmi les réguliers, et parmi les remarquables) et les répartir pour suggérer l'organisation (visuelle ou géographique) initiale (contours sur la figure C.3.8.3).

Chaque bâti est redessiné, soit par simple grossissement, soit par un rectangle, soit par une combinaison de rectangles. Les deux approches sont comparées théoriquement dans la thèse "phénoménologique".



**figure C.3.8.3** : bâtiments originaux et arbre recouvrant minimum ; structuration des bâtiments



**figure C.3.8.4** : diagramme de Voronoï sur les segments d'un groupe de bâtiments

Les bâtiments ne sont pas seulement groupés sur des critères de proximité et de voisinage, chacun est ensuite mesuré pour ses tailles, forme et orientation absolue relatives dans le groupe (approche gestaltique), et aussi pour ses distances minimale et maximale à la route et pour son orientation sur celle-ci (approche phénoménologique).

Des algorithmes de généralisation des groupes ont été programmés : un algorithme de structuration, dans l'approche gestaltique, et un algorithme de typification, dans l'approche phénoménologique. Le but des deux algorithmes est le même : étant donné un groupe d'objets trop dense pour être représenté tel quel à la nouvelle échelle, en sélectionner certains (parmi les réguliers, et parmi les remarquables) et les répartir pour suggérer l'organisation (visuelle ou géographique) initiale (contours sur la figure C.3.8.3).

Chaque bâti est redessiné, soit par simple grossissement, soit par un rectangle, soit par une combinaison de rectangles. Les deux approches sont comparées théoriquement dans la thèse "phénoménologique".

## Suites

### *Constitution de la contextualité*

Collaboration AGENT : le projet AGENT aura déjà démarré, fin 1998, ses travaux sur les aspects contextuels de la généralisation. En 1999, nous travaillerons sur l'identification des classes, des caractères et des contraintes associés au niveau méso. Ce travail se fera en collaboration avec l'université d'Edimbourg.

Les deux approches gestaltique et phénoménologique de la généralisation ont été comparées théoriquement dans la thèse "phénoménologique". Il reste à établir une comparaison chiffrée des algorithmes respectifs de ces approches (d'un point de vue algorithmique : comparaison des intégrabilités respectives dans un processus, de la paramétrisation des algorithmes, de la chronologie des calculs des structures nécessaires ; d'un point de vue cartographique : pertinences d'applicabilité sur des cas, comparaison des écarts de positionnement, des densités finales de bâtiments, etc...).

Une nouvelle thèse a démarré en octobre 1998, consacrée à la généralisation des données urbaines où les problèmes de généralisation contextuelle, pour des raisons de grande densité d'objets séparés, sont les plus pressants. Les travaux porteront sur l'extension des méthodes de lecture des espaces vides à l'identification d'entités urbaines aux limites floues (quartiers, centre ville, etc). Cette thèse a pour objectif d'améliorer et de généraliser la construction des objets du niveau méso.

### *Généralisation stratégique*

Le modèle de généralisation développé dans cette action de recherche doit être enrichi afin de proposer des méthodes assurant la dynamique du système.

En particulier certains points doivent être étudiés :

- les types de communication entre les différents niveaux d'analyse (planification, contrôle, conseil),
- les mécanismes de déclenchement pour des situations de même nature (négociation, collaboration),
- les mécanismes d'apprentissage pour assurer une meilleure convergence du système.

Les principes relatifs à ces difficultés seront décrits dans la thèse d'Anne Ruas (1999) et font l'objet d'une thèse démarrée en octobre 1998 par Annabelle Boffet. L'apprentissage est un point particulièrement important. Il vise à mettre au point des méthodes d'analyse des échecs afin d'améliorer dynamiquement le contenu des connaissances procédurales portées par les contraintes et les situations.

## Références

[CLOSMENIL 98] Stéphanie Closmenil : *Modélisation du concept AGENT pour la généralisation et implémentation sur Lamps2*, rapport de stage de DESS Informatique appliquée aux sciences de la Terre (Jussieu, Paris-6), laboratoire COGIT, IGN-SR 980038/S-STA, octobre 1998

[HANGOUËT 98a] Jean-François Hangouët : *Approche et méthodes pour l'automatisation de la généralisation cartographique ; application en bord de ville*, thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire COGIT, IGN-SR 980011/S-THE, novembre 1998

[HANGOUËT 98b] Jean-François Hangouët : *Vers la généralisation automatique*, in MappedMonde n° 49, février 1998, pp. 6-7, laboratoire COGIT, IGN-SR 980041/S-ART, 1998.

[REGNAULD 98] Nicolas Regnaud : *Généralisation du bâti : structure spatiale de type graphe et représentation cartographique*, thèse de doctorat, université de Marseille, laboratoire COGIT, IGN-SR 980010/S-THE, mai 1998

## Publications

[CHEYLAN, RUAS 98] Jean-Paul Cheylan & Anne Ruas : *Éditorial de la revue MappedMonde*, in MappedMonde n° 49, page 1, février 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980040/S-ART, 1998.

[RUAS 98] Anne Ruas : *OO-Constraint modelling to automate urban generalisation process*, in Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data Handling, pp. 225-235, juillet 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980042/S-COM, mai 1998.

## C.3.9 Maquette de généralisation

François Lecordix

### Contexte - objectifs

Le travail des années précédentes sur la généralisation a permis de mettre au point différents algorithmes pour traiter les lignes, en particulier routières, et de développer une plate-forme de recherche en généralisation (PlaGe) permettant de tester interactivement ces algorithmes.

En combinant outils automatiques et autant que possible outils interactifs, cette action de recherche vise à fournir un prototype de plate-forme de généralisation assistée par ordinateur.

### Résultats

La fin de l'année 1997 et le début de l'année 1998 ont permis de mettre au point la technique de généralisation adaptative du linéaire basée sur l'empâtement (GALBE) qui a été présentée aux Journées Recherche de l'IGN en mai 1998. L'amélioration de cette technique a servi de fil directeur aux travaux de l'année. Pour expliciter les travaux de l'année, il est donc opportun de rappeler les principes de cette technique.

Chaque ligne du réseau routier est segmentée en fonction de l'empâtement provoqué par la largeur du symbole représentant la route sur la carte. Ce découpage permet ensuite de classer alors les portions de lignes en trois catégories : celles, sans empâtement, qui sont traitées par un simple lissage gaussien ; celles, avec un seul empâtement (correspondant à un seul virage) qui subissent une ouverture de virage par l'algorithme de la faille maximale ; celles où il y a plusieurs empâtements (correspondant à une série de virages en lacets) qui sont traitées par l'algorithme de l'accordéon pour écarter les virages à leur base, puis l'algorithme de la faille minimum pour écarter les virages à leur sommet.

Cette technique adaptative permet donc de découper les lignes, classer les portions et appliquer à chacune l'algorithme adéquat. Mais le choix de la valeur des paramètres était réalisé jusqu'alors de façon empirique et ne variait pas en fonction des caractéristiques de la ligne, empêchant une automatisation parfaite. Les travaux de l'année se sont donc attachés à automatiser le choix des paramètres.

Ainsi dans le cas de la série des virages en lacets, l'algorithme de l'accordéon qui permet d'écarter la série de virages dépend de deux paramètres : le paramètre de lissage  $\sigma$  intervenant dans la détection des points d'inflexion de la courbe (le lissage permettant d'éliminer les inflexions non significatives), et le paramètre  $\varepsilon$  d'écartement à appliquer entre les points d'inflexion. Par une démarche itérative, avec analyse de la répartition angulaire des points d'inflexion successifs et des sommets intermédiaires, il est désormais possible de déterminer automatiquement la valeur du paramètre de lissage  $\sigma$ . De même, pour le paramètre d'écartement  $\varepsilon$ , une amélioration de l'algorithme de l'accordéon permet désormais de déterminer automatiquement et de façon spécifique à chaque virage de la série, la valeur de l'écartement à appliquer et sa direction.

D'autre part, par mesure de l'écartement provoqué entre les deux extrémités de la série de virages, il est possible de refuser l'opération de caricature proposée car l'écartement est mesuré trop important et d'appliquer alors un autre algorithme comme celui de schématisation de virages (suppression de virages dans la série). Cet algorithme de schématisation est en cours d'amélioration pour pouvoir déterminer automatiquement les paramètres, en particulier déterminer automatiquement quels sont les virages de la série à supprimer.

Grâce à ces automatisations du choix des paramètres, une expérience de généralisation du réseau routier de tout le département des Alpes Maritimes, pour une carte touristique, a été faite pour le Service de la Cartographie Dérivée et Thématique (Produit cartes issues des bases de données). Ce département, contenant 8 000 km de routes, est un des plus difficiles en terme de généralisation du routier. Avec la symbolisation choisie, il comporte 900 km d'empâtement.

En utilisant le procédé GALBE, 60% des conflits d'empâtement ont été résolus automatiquement, les autres pouvaient être détectés automatiquement et traités interactivement. De même pour les conflits de superposition entre arcs routiers, la plate-forme PlaGe a permis de détecter et résoudre interactivement le problème. Ce test a validé un prototype de plate-forme de généralisation qui peut être industrialisé et le sera vraisemblablement avec des améliorations dans le cadre du projet européen AGENT que dirige le laboratoire COGIT.

Pour améliorer encore les résultats d'automatisation (40% des conflits d'empâtement non résolus sur le test des Alpes Maritimes), des travaux ont été effectués pour améliorer la localisation des points d'inflexion en utilisant différentes méthodes (utilisation des sommets pour positionner les points d'inflexion, introduction des zones quasi plates, parcours de la ligne dans les deux sens). Une comparaison des méthodes de détection des points d'inflexion est en cours pour déterminer la méthode qui répond au mieux à nos besoins.

En ce qui concerne les portions de lignes sans empâtement, elles nécessitent aussi des opérations de généralisation (lissage ou exagération de certaines formes sinueuses). Mais les mesures pour déterminer les algorithmes et les valeurs des paramètres à appliquer s'avèrent plus difficiles à trouver automatiquement. Pour résoudre ce problème, les travaux se sont dirigés suivant deux axes. D'une part, du fait du manque de mesures permettant de caractériser la forme de la ligne de façon assez significative (différents niveaux de sinuosité, homogénéité...), des recherches ont été poursuivies dans ce domaine. L'objectif est de fournir soit des mesures de forme globale d'une ligne, soit locale d'un virage. Le travail s'appuie sur la courbure de la ligne ce qui nécessite une modélisation mathématique de la ligne.

D'autre part, dans le cadre d'une thèse, une maîtrise des techniques d'apprentissage est en cours. Des expériences ont été faites avec des systèmes experts : un premier essai (implémentation de GALBE) avec OPS5 a été fait en couplant le système expert avec PlaGe ; la solution n'étant pas idéale, une deuxième expérience est en cours avec CLIPS.

## Suite

Cette action de recherche se termine cette année et a abouti à un prototype de plate-forme de généralisation du linéaire routier semi-automatique qui va être industrialisé dans le logiciel Lamps2 de Laser-Scan. Cette industrialisation s'effectuera dans le cadre du projet AGENT. En terme de recherche, le travail va être poursuivi dans une nouvelle action de recherche qui se concentrera sur les techniques d'apprentissage et dans l'action de recherche de généralisation des réseaux.

## Publications

[MUSTIÈRE 98a] Sébastien Mustière : *GALBE : Adaptive Generalisation. The Need for an adaptive Process for automated Generalisation, an Example on Roads*, GIS PLANET'98, Lisbonne (P), 7-11 septembre 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980024/S-COM, 1998.

[MUSTIÈRE 98b] Sébastien Mustière : *Legibility detection : a necessary tool for Geographic Information Systems*, Intercarto'98, Barnaul (Russie), laboratoire COGIT, IGN-SR 980026/S-COM, 1998.

## C.3.10 Étude préalable à la création d'un centre d'étude sur les applications des SIG au sein de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG)

Jean Denègre

### Contexte

Le Livre Blanc élaboré par le Conseil National de l'Information Géographique (CNIG) et par l'Association Française pour l'Information Géographique (AFIGEO) et intitulé : " *L'information géographique française dans la société de l'information* ", souligne que les recherches thématiques visant à développer de nouvelles utilisations sont un enjeu essentiel [et qu'] un véritable programme national de recherche doit être mis en place, [avec] un spectre plus large couvrant les aspects technologiques, *applicatifs* et organisationnels de l'information géographique.

Dans cet esprit, l'École nationale des sciences géographiques (ENSG) a proposé de développer en son sein un centre d'étude sur les applications des SIG, dont les objectifs et la faisabilité sont l'objet de la présente étude.

### Objectifs

- Démontrer le potentiel d'application des bases de données géographiques de référence élaborées par l'IGN et insuffisamment exploitées en aval, à l'extérieur de l'IGN : faire un tour d'horizon des principaux partenaires de l'IGN en matière de recherche en SIG.
- Inventorier les stages des élèves-ingénieurs de l'ENSG, qui constituent autant d'occasions, généralement réussies, d'innovation et d'analyse des besoins des utilisateurs et mettre en évidence le besoin de capitaliser les acquis de ces stages, actuellement peu ou pas utilisés.
- Étudier les scénarios possibles pour mettre en œuvre un centre d'étude sur les applications des SIG à l'École, basé sur un développement pragmatique et progressif, compte tenu des moyens disponibles.

## Suite

L'étude a montré que l'attente des principaux partenaires de l'IGN (CERTU, CNRS, INRIA, Universités, etc) en matière d'applications des SIG est très forte et que de nouveaux partenaires potentiels se font connaître à un rythme soutenu (ENPC, HEC, INRETS). Parmi les quelque soixante-seize stages SIG réalisés à l'extérieur de l'ENSG depuis cinq ans, les trois-quarts ont été effectués à l'extérieur de l'IGN. Leur succès croissant est certes un indicateur d'intérêt pour l'information géographique, mais risque d'accentuer encore la dispersion des thèmes abordés (aménagement du territoire, transports, réseaux, environnement, géomercatique, etc).

Le thème le plus porteur, identifié en rapprochant les deux inventaires précédents (inventaire des partenaires, inventaire des stages), apparaît comme celui des *transports*. Ce thème se présente, en effet, comme l'un des plus riches et ouverts en termes d'applications des SIG, tant sur le plan des infrastructures (réseaux, aménagement du territoire) que sur celui des sociétés (économie, mercatique) et de l'environnement (pollutions, risques industriels liés au transport de matières dangereuses). De plus, il présente une dimension européenne évidente et une capacité forte à mobiliser des crédits importants susceptibles de financer des recherches d'intérêt général.



Parmi les scénarios pouvant concrétiser cette orientation, l'École propose de retenir le plus pragmatique, basé sur un co-financement avec des partenaires extérieurs, de façon à équilibrer les apports du budget recherche de l'IGN. Ce scénario consisterait à adjoindre à l'ingénieur géographe actuellement chargé de l'enseignement des SIG, un autre ingénieur qui serait responsable d'une recherche sur les transports dans le cadre d'un contrat avec le partenaire extérieur qui pourrait être l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS). Le scénario inclurait le suivi de stages d'ingénieurs-élèves et les contacts avec d'autres organismes partenaires intéressés. Il se poursuivrait au cours des années 1999-2001.

## Publication

Rapport d'étude préalable n° 98.0949/ENSG/JD, adressé à la Direction Technique le 30 avril 1998.

## C.3.11 Étude des applications des SIG aux transports

*Patricia Bordin, Eric Hurtebis (IGN) et Fabien Leurent (INRETS)*

### Contexte

L'étude s'inscrit dans le cadre du projet ETUI (Economie du Transport Urbain Intermodal), développé par l'INRETS, en partenariat avec l'IGN/ENSG et des collectivités territoriales rennaises, ainsi que des services déconcentrés de l'État (DDE d'Ille-et-Vilaine). Elle prend la suite directe de l'étude préalable, réalisée en 1997-1998, sur la création à l'ENSG d'un *centre d'étude sur les applications des SIG*, dont elle constitue ainsi la première illustration.

### Objectifs

La recherche a pour objectif une représentation fidèle des *déplacements* à l'intérieur de l'agglomération de Rennes, pour, à la fois constituer une vitrine technologique des modèles de déplacements et simuler des scénarios prospectifs d'offre (planification et exploitation des différents réseaux modaux). Cette action s'inscrit notamment dans la perspective de l'implantation d'un système automatique de transport VAL dans l'agglomération de Rennes, à l'horizon 2001. Elle pourrait permettre à terme de fournir des outils d'aide à la décision en matière d'investissements et d'exploitation des transports collectifs.

### Suite

L'étude réalisée en quatre mois (comme prévu dans l'action de recherche proposée) s'est déroulée du 1er février au 5 juin 1998. Elle a été conduite par E. Hurtebis, en l'absence de P. Bordin, et sous la direction scientifique de F. Leurent, ingénieur des Ponts et Chaussées.

Elle a comporté les trois phases suivantes, qui ont toutes été menées à bien :

- test et mise en œuvre du logiciel SIG & Transports, dénommé TransCAD, avec application aux BD de l'IGN,
- codage du réseau routier de l'agglomération de Rennes à partir de la BD Géoroute existante,
- prise en compte des déplacements urbains collectifs intermodaux dans Rennes, à partir d'une enquête des ménages (matrice origines-destinations).

Sur le plan pratique, l'étude a consisté en un nombre important de travaux d'importation de fichiers et de nouvelles saisies (îlots INSEE, zones de l'enquête déplacements, par exemple), ainsi que d'interfaçages entre TransCAD, Arc-Info, Géoroute, la matrice origines-déplacements. Il a été mis en évidence l'efficacité du logiciel TransCAD, jugé à la fois puissant et ergonomique, en tant que logiciel réunissant les fonctionnalités SIG et transports (exemple : calcul d'itinéraires, intégration de données sur les déplacements d'usagers, etc..).

Des retombées intéressantes, au passage, ont porté sur :

- une évaluation qualité supplémentaire de Géoroute, étayant des observations déjà faites sur sa précision et sur certains défauts résiduels de conception (cas de deux chaussées séparées se joignant en une seule chaussée (par l'intermédiaire de deux arcs fictifs), ne comportant pas d'interdiction de *demi-tour*, c'est-à-dire d'aller du premier arc fictif au second),
- l'établissement d'une carte d'accessibilité, d'un calcul de zones isochrones depuis un point, d'une carte de l'influence des travaux (= des chantiers), etc.

Les tâches suivantes devront faire l'objet de la suite de l'étude : l'exploitation complète de l'enquête ménages avec TransCAD, la quantification des émissions de bruit et de polluants, le calcul de l'utilité économique et sociale d'un

scénario d'offre de transports publics, le codage du réseau de transport collectif, la confrontation de la simulation de la circulation et des mesures sur le terrain. Ces travaux pourront être menés en 1999 autour du pôle SIG de l'École, à condition qu'un chercheur permanent lui soit affecté et puisse reprendre les acquis techniques obtenus en 1998.

L'opportunité de ce type de recherche apparaît pleinement, à la fois parce qu'elle correspond à des besoins réels et précis des décideurs territoriaux, qu'elle valorise les Bases de Données de l'IGN, en montrant leur potentiel d'applications et qu'elle tire le meilleur parti de la pluridisciplinarité de l'ENSG et de ses moyens.

## **Publications**

[HURTEBIS 98] É. Hurtebis : *Étude du logiciel TransCAD*, rapport, 38 pages, juin 1998.

[Projet d'article] dans la revue TEC (Transports, Environnement, Circulation), après validation par la Ville de Rennes.

Claude Boucher (responsable du thème géodésie)

### C.4.1 Amélioration de l'ITRS

Patrick Sillard

#### Contexte

Cette action se poursuit depuis trois ans et correspond aux travaux de thèse de P. Sillard. Ceux-ci se sont portés sur plusieurs aspects ayant trait aux problèmes de compensation et de modélisation stochastique des systèmes de référence.

#### Objectifs - résultats

Les données géodésiques de positionnement ont vu leur précision s'améliorer considérablement depuis dix ans. De quelques décimètres, on est aujourd'hui rendu à une précision inférieure au centimètre. De façon à s'adapter à ce nouveau contexte, il devient nécessaire d'affiner les modélisations employées pour réduire ces données.

En particulier, l'ITRF étant construit sur la base d'une combinaison de populations hétérogènes, l'un des premiers soucis est d'homogénéiser ces populations d'un point de vue statistique. Ces travaux ont aussi été l'occasion de mieux comprendre la définition statistique et mécanique des systèmes de référence terrestre.

Enfin, une attention toute particulière a été portée aux variations du centre des masses de la Terre, physiquement assimilé, via les lois de la mécanique, à l'origine du système de référence. Les variations supposées du géocentre engendrent une instabilité du système de référence. Il convient donc de tenir compte de ces variations pour réaliser un système stable dans le temps. L'une des conclusions importantes de ce travail est que, à l'heure actuelle, la géodésie spatiale n'est pas encore en mesure de mettre en évidence ces fluctuations.

#### Suite

Cette action se termine avec la thèse déjà mentionnée. Dans l'avenir, il est prévu deux ramifications de ces travaux : d'une part, un nouveau mode de représentation des systèmes de référence terrestre va être développé à partir d'une expérience menée sous l'égide de l'IERS et visant à réaliser un ITRS sous forme de séries temporelles ; d'autre part, le savoir-faire statistique, développé dans cette action sera appliqué au traitement des données de nivellement français.

#### Publications

[BOUCHER, SILLARD 98] C. Boucher & P. Sillard : *Synthesis of submitted geocenter time series*, IERS technical note 25, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

[SILLARD 98a] P. Sillard : *No-Net Rotation Tisserand condition implementation*, IAG section II int. Symposium : Towards an integrated global geodetic observing system, Munich (Allemagne), October 5-9, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

[SILLARD 98b] P. Sillard : *Les variations du géocentre déterminées par DORIS et les autres techniques de Géodésie spatiale*, DORIS DAYS, Toulouse (F), 17-29 avril 1998, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

[SILLARD 98c] P. Sillard : *GPS, DORIS and SLR combined geocenter motion from reference frame time series analysis*, in IERS technical note 25, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

[SILLARD et al 98] P. Sillard, Z. Altamimi & C. Boucher : *The ITRF96 and its associated velocity field*, in Geophysical Research Letters, volume 25, pp. 3223-3222, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

### C.4.2 Positionnement DORIS

Pascal Willis

#### Contexte

Le système DORIS est un système français développé par le CNES en collaboration avec l'IGN.

Ses applications sont nombreuses : orbitographie précise de satellites bas (logiciel DIODE du CNES), positionnement géodésique de stations au sol et détermination des paramètres de la rotation terrestre, estimation du champ de gravitation terrestre,....

Dans ce contexte, DORIS a été accepté en 1995, comme l'une des techniques de l'IERS (Service Internationale de la Rotation Terrestre). La coordination internationale DORIS pour l'IERS est assurée par l'IGN (Pascal Willis). Un centre de données international (Laurent Duhem) a été développé ainsi qu'un site Web (<http://lareg.ensg.ign.fr/DORIS>) et un système de messagerie spécialisée. Ce système est, d'ores et déjà, prévu sur de nombreux satellites futurs (ENVISAT, SPOT-5, JASON,...).

## Objectifs - résultats

L'objectif pour l'IGN est d'améliorer les résultats obtenus pour le positionnement géodésique de précision (meilleure précision, diminution du temps de mesures nécessaire), ainsi que d'évaluer de nouvelles applications.

Les calculs DORIS sont réalisés à l'IGN avec le logiciel GIPSY/OASIS du Jet Propulsion Laboratory (USA) dans le cadre d'une collaboration scientifique initialisée en 1991 avec le projet Topex/Poseidon.

Plusieurs résultats intéressants ont été obtenus à l'IGN en 1998 :

- réalisation d'une nouvelle solution globale (position et vitesse) prenant en compte la totalité des données DORIS fournies à l'IERS,
- calculs de séries hebdomadaires et mensuelles de coordonnées des stations de poursuite (résultats consultables sur le Web DORIS de l'IGN),
- estimation des variations temporelles du géocentre (dues aux variations de masses du système Terre-Océan-Atmosphère),
- validation des résultats DORIS obtenus pour la correction troposphérique et utilisation possible dans des modèles météorologiques (en liaison avec Météo France) ou climatique,
- amélioration des modèles physiques et des modèles d'estimation dans le logiciel GIPSY/OASIS.

## Suite

Cette recherche s'inscrit dans la durée (spécialement vu le nombre de satellites DORIS lancés dans les années à venir) et dans le cadre d'un partenariat scientifique avec le CNES, le GRGS/CNES et le JPL (USA).

Plusieurs améliorations importantes ont été obtenues en 1998 sur le plan de la modélisation (prise en compte des surcharges atmosphériques, nouveau champ de gravitation, correction troposphérique), ce qui justifiera en 1999 un recalcul de la totalité des données DORIS (depuis 1990). On peut aussi espérer en 1999 que les données DORIS de 1990 à 1994 seront désormais disponibles.

## Publications

[CALMANT et al 98] S. Calmant, A. Cazenave, J.-J. Valette, P. Willis & Motevas : *Mouvements Tectoniques Verticaux par Altimétrie Satellitaire*, poster présenté, in Actes des Journées DORIS, 27-29 avril 1998, Toulouse (F), 1998.

[CAZENAVE, WILLIS 98] A. Cazenave & P. Willis : *Géodésie, Encyclopaedia Universalis, Dictionnaire des Sciences de la Terre*, Albin Michel, pp. 254-266, 1998.

[KAISTRENKO et al 98] V. Kaistrenko, N. Vasilenko & P. Willis : *The great Shikotan earthquake and tsunami october 4, 1994 and earth crust deformations detected by Topex/Poseidon*, poster présenté, in Actes des Journées DORIS, 27-29 avril 1998, Toulouse (F), 1998.

[WILLIS 98a] P. Willis : *Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite (DORIS), Report of the DORIS/IERS Coordination for 1997*, 1997 IERS Annual Report, Observatoire de Paris, pp. I-21-I-28, 1998.

[WILLIS 98b] P. Willis : *DORIS/IERS Processing at IGN : global solutions and time series*, présenté à l'IERS Workshop, Potsdam (Allemagne), 28 septembre - 2 octobre 1998.

[WILLIS 98c] P. Willis : *Monitoring geocenter and scale variations using DORIS data, Monthly and weekly comparisons toward ITRF references*, IERS Technical Note n° 25, Observatoire de Paris, 11 pages, 1998.

[WILLIS 98d] P. Willis : *Geodetic and Geophysical applications of the DORIS/ENVISAT data within the International Earth Rotation Service*, proposition ENVISAT à l'Agence Spatiale Européenne, IGN/LAREG 98.396, juin 1998.

[WILLIS et al 98] P. Willis, Y. Bar-Sever, E. Doerflinger & J. Zumberge : *Using DORIS data for determining the tropospheric delay: Implications on climatology and meteorology*, in Actes des Journées DORIS, 27-29 avril 1998, Toulouse (F), 9 pages, 1998.

[WILLIS, SILLARD 98] P. Willis & P. Sillard : *Weekly solutions for stations coordinates: early results and perspectives*, in Actes des Journées, 27-29 avril 1998, Toulouse (F), 9 pages, 1998.

## C.4.3 Traitement de données GPS en Antarctique

Marie-Noëlle Bouin

### Contexte

La connaissance précise des mouvements actuels de la croûte terrestre en Antarctique est un enjeu essentiel pour la géophysique comme pour la glaciologie. Cela permet, à partir de modèles de déglaciation, d'affiner la détermination des paramètres rhéologiques de la Terre (viscosité du manteau supérieur et du manteau inférieur, épaisseur de la lithosphère) ; cela fournit également des indications sur le comportement actuel de la calotte glaciaire antarctique (accroissement ou débâcle), et sur l'évolution du niveau des mers. Les mouvements que l'on cherche à détecter sont très faibles (de l'ordre de cinq à dix millimètres par an sur la composante verticale, quelques millimètres par an selon la latitude et la longitude).

On a traité toutes les données GPS disponibles sur l'Antarctique depuis l'existence de stations IGS. Le but de ce traitement est double : obtenir des séries temporelles suffisamment peu bruitées pour pouvoir y détecter les mouvements recherchés, et aussi peu influencées que possible par des effets géodésiques, dans la mesure où l'on cherche à détecter un signal géophysique.

Différents types de traitements ont été expérimentés, à partir des possibilités offertes par le logiciel de calcul GPS utilisé (logiciel GAMIT du MIT). Dans un premier temps, le réseau considéré incluait uniquement les stations IGS situées sur le continent antarctique lui-même, pour limiter au maximum l'influence des effets géodésiques, en particulier, ceux provenant de stations extérieures.

Les séries temporelles obtenues sont perturbées par des erreurs d'origine diverse, mais pour la plupart spécifiques à la situation particulière de l'Antarctique : le réseau des stations IGS en Antarctique ne comprend que quatre stations, séparées par des lignes de base de plus de 1 500 km, ce qui contraint peu le calcul et interdit toute résolution d'ambiguïtés entières.

L'ionosphère est très active au-dessus des régions polaires, l'utilisation de la combinaison linéaire des deux fréquences L1 et L2, qui ne concerne que le premier ordre du bruit ionosphérique, ne suffit pas à éviter une perturbation importante des mesures. Les orbites utilisées au cours du calcul (orbites précises IGS) ont une précision moindre au-dessus de l'Antarctique, puisque les stations IGS qui servent à les établir sont moins nombreuses dans l'hémisphère sud.

### Objectifs - résultats

L'intérêt de cette étude est d'obtenir des indications sur les mouvements actuels de la croûte terrestre en Antarctique, principalement ceux qui sont dus aux variations de masses de glace, présentes ou passées. Les séries temporelles obtenues sont à comparer aux vitesses prédites par différents modèles (modèles d'isostasie, mais aussi vitesses horizontales liées au mouvement des plaques, mouvements tectoniques éventuels).

Au-delà de l'objectif géophysique, on est confronté à des problématiques de méthodologie, liées à la stratégie de calcul en réseau : comment concilier stabilité et indépendance de contraintes géodésiques, comment opérer un rattachement à un système de référence mondial. Cette étude fait également appel à l'analyse de séries temporelles, en particulier à la discrimination des différents types de bruits et de leurs caractéristiques (bruit corrélé ou décorrélé).

On a utilisé la possibilité offerte par le logiciel de traitement GAMIT, d'ajuster au cours du calcul les paramètres d'orbites au même titre que les positions de stations ou d'autres paramètres, pour tenter d'améliorer la qualité des orbites IGS au-dessus de l'hémisphère sud, diminuant ainsi la dispersion des positions de stations obtenues en résultat de calcul.

On a également élargi le réseau, en y incluant d'autres stations IGS proches de l'Antarctique. Le but de ce type de calcul est double : d'une part, augmenter la densité du réseau (le nombre de lignes de base passe de 6 à 55, sans que leur longueur ne change d'ordre de grandeur), de l'autre, permettre un rattachement a posteriori à un système de référence, par exemple par le biais d'une transformation à sept paramètres. Les positions de certains sites, choisis comme stations fiducielles, sont ramenées à leur valeur dans l'ITRF 96. La solution obtenue grâce à ce type de calcul est beaucoup moins bruitée, mais plus contrainte d'un point de vue géodésique.

Grâce au soutien financier de l'IFRTP (Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaire), une station GPS permanente a été installée en décembre 1997 à Dumont d'Urville, produisant des données de qualité IGS depuis.

### Suite

Les résultats de cette étude sont prometteurs, tant du point de vue des estimations de mouvements géophysiques que des progrès concernant le traitement des réseaux GPS permanents aux basses latitudes sud. Plusieurs stations GPS permanentes de type IGS ont été installées récemment en Antarctique ou sur des territoires proches (outre Dumont, les stations de Sanae, Amundsen, Palmer et Gough Island), densifiant le réseau et permettant d'obtenir des résultats beaucoup plus fiables.

## C.4.4 JASON

Pascal Willis

### Contexte

JASON est une future mission d'altimétrie spatiale succédant à la mission franco-américaine actuelle Topex/Poseïdon. Dans ce cadre, l'IGN (PI Pascal Willis) a fait une proposition de recherche au CNES et à la NASA sur l'étude des systèmes de référence terrestres.

Cette recherche est effectuée dans le cadre d'une thèse financée par l'IGN (Laurent Morel) et en étroite collaboration avec le groupe Système de Référence Terrestre pour l'IERS (Claude Boucher & Patrick Sillard) ainsi qu'avec le CNES (Jean-Paul Berthias) qui produit les orbites opérationnelles pour ces deux missions océanographiques.

### Objectifs - résultats

Les objectifs de cette recherche sont multiples et pourraient être synthétisés de la manière suivante :

- identifier toutes les erreurs provenant du " systèmes de référence terrestre " dans la totalité des produits océanographiques (identifier, comprendre, quantifier),
- réaliser un nouveau système de référence terrestre directement utilisable par la communauté océanographique (comprenant en particulier, toutes les stations de poursuite, dont PRARE, et certains points d'intérêt océanographique majeur comme les sites de calibration des altimètres et certains marégraphes,
- proposer (si possible) des algorithmes simples permettant de modifier les orbites opérationnelles anciennes afin de transformer celles-ci dans un système de référence terrestre unique, bien identifié et maintenu de manière stable dans le temps.

En 1998 (début de la thèse de L. Morel), le premier objectif a été de finaliser la proposition de recherche et de fournir un premier document d'organisation du travail en accord avec la totalité des participants. Des premières études ont été menées, afin de comparer les systèmes de référence terrestre utilisés de manière opérationnelle par le CNES et la NASA pour les orbites opérationnelles de la mission Topex/Poseïdon.

Des erreurs systématiques ont pu être mises en évidence (erreurs qui iront en s'accroissant avec le temps sur la stabilité du facteur d'échelle et de la composante Z de l'origine). Grâce au logiciel GIPSY/OASIS installé au laboratoire LAREG, de premières études ont permis d'estimer les conséquences d'erreurs systématiques sur les coordonnées des stations de poursuite DORIS et sur la qualité de l'orbite Topex/Poseïdon obtenue.

Enfin, une étude a été menée sur l'ITRF-94 et l'ITRF-96 mettant en évidence certains problèmes sur la fiabilité de certaines stations DORIS (en général, des stations ayant peu d'observations).

### Suite

Cette action de recherche s'inscrit clairement dans la durée (la thèse de L. Morel n'en est qu'à son début et le satellite JASON ne sera lancé probablement qu'en début 2000). L'étude sur la qualité des différents systèmes de référence reste à terminer.

La réalisation d'un jeu de coordonnées spécialisé devrait être la priorité en 1999 (en liaison avec l'activité ITRF du laboratoire LAREG) afin de proposer ce jeu comme nouveau standard avant le lancement du satellite JASON.

### Publications

[MOREL 98a] L. Morel : *Définition et étapes du travail de thèse*, rapport de thèse n°1, IGN/LAREG CR n° 23, mars 1998.

[MOREL 98b] L. Morel : *Recherche d'effets systématiques sur l'orbite du satellite Topex/Poseïdon*, rapport de thèse n°2, août 1998, IGN/LAREG CR n° 24.

[MOREL et al 98] L. Morel, C. Boucher, J.-P. Berthias & P. Willis : *Terrestrial reference frame differences for Topex/Poseïdon and their impact on precise orbit determination*, poster présenté au JASON Science Working Team, Keystone (USA), 12-14 octobre 1998.

[MOREL, WILLIS 98] L. Morel & P. Willis : *Preliminary investigation on erroneous ITRF stations coordinates of the DORIS tracking network*, poster présenté au JASON Science Working Team, Keystone (USA), 12-14 octobre 1998.

[WILLIS 98] P. Willis : *Comparison of the CNES and NASA reference systems with the ITRF reference*, communication présentée au JASON Science Working Team, Keystone (USA), 12-14 octobre 1998.

## C.4.5 GNSS

Pascal Willis

### Contexte

GNSS (Global Navigation Satellite System) est un projet européen de navigation par satellites, dont la première étape est le service EGNOS et dont la réalisation est prévue à l'horizon 2005-2015. Dans ce contexte, cette action de recherche s'intéresse à étudier précisément les systèmes déjà existants (système allemand PRARE, système russe GLONASS) dans un objectif de prospective scientifique. De plus, une participation aux groupes de travail en France et en Europe est importante pour maintenir une certaine présence de l'IGN dans ce domaine.

### Objectifs - résultats

Le système allemand PRARE a fait l'objet d'une étude réalisée dans le cadre d'un stage de DEA (N. Gruel). Cette étude a permis de développer les modèles et les algorithmes nécessaires à des calculs PRARE pour l'orbitographie d'ERS-2 et pour la localisation. Le mouvement d'une station en Antarctique (située sur les glaces et donc ayant une vitesse de déplacement rapide) a pu être mis en évidence. Les modifications du logiciel avaient été effectuées au préalable lors d'un séjour de P. Willis au JPL.

Suite aux décisions prises lors de l'Assemblée Scientifique de l'Association Internationale de Géodésie à Rio (Brésil), septembre 1997, un groupe de coordination international a été créé (président P. Willis) pour mettre en place fin 1998 une campagne internationale d'observation géodésique des satellites GLONASS (à partir des mesures GLONASS et à partir des mesures laser). Ce groupe a rédigé des spécifications techniques et un appel international a participation scientifique a été largement diffusé. De nombreux organismes ont répondu favorablement (dont l'IGN), soit au total soixante-deux organismes différents de trente-deux pays différents (incluant environ soixante-cinq récepteurs GLONASS, sept centres de données et treize centres d'analyse scientifique).

Un site Web a été créé ainsi qu'une messagerie spécialisée afin d'assurer la coordination de tous ces groupes (<http://lareg.ensg.ign.fr/IGEX>). Cette campagne débutera le 20 octobre et se continuera de manière permanente au moins jusqu'à fin janvier 1999. L'IGN participera comme centre de données (L. Daniel) et installera des récepteurs GLONASS (C. Boucher) en colocation avec d'autres sites importants du réseau mondial ITRF : Libreville, La Réunion et peut-être aussi Tahiti.

Concernant plus précisément le futur système européen GNSS, P. Willis fait partie du groupe européen " Forum GNSS-2 " (sous-groupe besoins des utilisateurs) qui doit rendre ses conclusions fin 1998 en vue d'une décision de principe de la Commission Européenne au printemps 1999. P. Willis fait aussi partie du groupe interministériel français sur le GNSS. De plus, C. Boucher participe à un groupe de travail GNSS de la DRAST (président par Pascal Chambon).

### Suite

GNSS est un projet d'importance européenne majeur. Il est essentiel que les aspects " localisation de précision " n'y soient pas absents, laissant dans ce cas le système américain GPS comme seule solution possible. Des études de fond sont nécessaires (études des systèmes déjà existants comme le système PRARE) ainsi que des travaux dans des groupes de travail. Dès que le projet sera un peu mieux finalisé au niveau européen, il sera possible (et important) de répondre aux futurs appels d'offres que fera la Commission européenne en collaboration avec des partenaires scientifiques et/ou industriels à définir.

Concernant le système PRARE, faute de temps, seules les mesures de pseudo distances n'ont pu être traitées. Un nouveau sujet de stage sera reproposé en 1999, afin d'étudier plus en détails, les mesures Doppler (beaucoup plus précises).

Concernant le système GLONASS, les développements dépendront des résultats réellement obtenus en 1999 grâce aux mesures de la campagne IGEX-98. En cas de succès, on peut espérer que cette campagne se transforme en service scientifique international (de la même manière que l'IGS - International GPS Service - avait été créé). Il sera important en 1999 de remettre à niveau le logiciel GIPSY/OASIS (comme cela a déjà été fait avec succès pour DORIS et PRARE) pour pouvoir traiter les mesures GLONASS à l'IGN.

### Publications

[BOUCHER 98] C. Boucher : *Scientific applications of GPS and GLONASS : a challenge for GNSS*, présentation invitée, Symposium GNSS, Toulouse, octobre 1998.

[GRUEL 98] N. Gruel : *Positionnement géodésique avec le système PRARE*, mémoire de stage de DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, Observatoire de Paris, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, juin 1998.

[SLATER et al 98] A. Slater, P. Willis, W. Gurtner, C. Noll, G. Beutler, G. Hein, R.-E. Neilan : *The International GLONASS Experiment (IGEX-98)*, in Proceedings of the Institute of Navigation, ION GPS'98, Nashville (USA), pp. 1637-1644, septembre 1998.

[WILLIS et al 98] P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R. Neilan & J. Slater : *International Call for Participation to the IGEX-98 campaign*, in Journal of Geodesy, 72, 5, p. 313, 1998.

[WILLIS et al 98] P. Willis, W. Gurtner, G. Beutler, G. Hein, R. Neilan & J. Slater, IGEX : *International GLONASS Experiment, Scientific objectives and preparation*, COSPAR assembly, Nagoya (Japon), juillet 1998, in Advance Space Research, accepté pour publication, 1998.

## C.4.6 Niveau moyen des mers : suivi par les techniques de géodésie et de marégraphie

Guy Wöppelmann

### Contexte - objectifs

Cette action de recherche se situe dans la suite logique du travail de thèse effectué par G. Wöppelmann au laboratoire LAREG sur le rattachement géodésique des marégraphes, thèse présentée le 23 juin 1997 à l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG). Il s'agit à présent d'exploiter les résultats et les enseignements que nous avons tirés de cette étude. Pour cela, nous avons uni nos compétences et nos moyens à ceux de l'Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM).

Plusieurs objectifs sont visés dans cette action de recherche. Tout d'abord, l'évaluation, le contrôle, et la mise à niveau des observatoires côtiers français participant au réseau mondial de marégraphes GLOSS de la Commission Océanographique Intergouvernementale, en particulier, les marégraphes de Brest et de Marseille, qui se trouvent respectivement sous la responsabilité du SHOM et de l'IGN. La précision instrumentale recherchée est d'ordre scientifique, aussi bien pour la mesure de hauteur d'eau que pour la surveillance géodésique de la référence du marégraphe dans un système géodésique mondial comme l'ITRS.

En 1996, l'IGN a réalisé une étude préalable pour le Ministère de l'Environnement dans le cadre de leur programme "Élévation du niveau de la mer". L'étude portait sur la mise en place au niveau national d'un Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL) fondé sur la synergie des techniques de marégraphie et de géodésie spatiale. Nous avons démarré son développement avec le SHOM en 1998.

SONEL a l'ambition de devenir un point de rencontre et d'échanges en France sur le thème "géodésie et niveau des mers", ainsi qu'une interface privilégiée avec l'étranger dans le domaine synergique susdit, notamment dans les projets européens, tels que EOSS ou EUVN, et mondiaux tels que GLOSS, ou encore dans l'échange avec les centres de données internationaux tels que le PSMSL.

### Activités - résultats

Notre premier travail a été de définir et d'organiser plus précisément les activités de l'étude et, en particulier, du développement du projet SONEL. Nous avons rédigé un document de référence sur SONEL. Ce document décrit les objectifs, la nature et l'organisation de SONEL, ainsi que les données et les produits combinés de la marégraphie et de la géodésie spatiale du futur service. Un effort de clarté était recherché ; le document nous servira à présenter SONEL à nos futurs partenaires et utilisateurs.

Les marégraphes de Brest et de Marseille sont des stations-pilotes importantes du projet. Nous les avons équipés du matériel nécessaire pour leur mise à niveau, suivant les critères du réseau mondial GLOSS. Marseille dispose depuis juin 1998 d'un marégraphe moderne de type acoustique, avec acquisition numérique. La surveillance géodésique des deux marégraphes se fait par récepteur GPS permanent : celui de Marseille est en place depuis juillet 1998 et celui de Brest depuis octobre 1998 dans son emplacement définitif. La phase de test de fonctionnement est en cours. Les observations GPS sont collectées, puis traitées dans le réseau GPS national RGP.

Dans le développement du centre de données SONEL, l'idée est d'utiliser l'expérience acquise depuis quelques années par le laboratoire LAREG avec le Service International GPS (IGS) et d'adapter les solutions techniques et les procédures mises en œuvre dans ce cas à nos besoins. Nous avons commencé l'étude de la structure du futur centre de données, définissant un certain nombre de besoins et de contraintes techniques pour le développement d'une maquette qui soit aussi proche que possible du futur service.

Nous avons réfléchi à la mise en place d'un groupe de coordination de SONEL et nous avons exploré les fonctions et les objectifs possibles d'un tel groupe. L'idée est, qu'il aille au-delà du seul pilotage du projet SONEL et qu'il coordonne les activités de géodésie et de marégraphie en France. Nous avons établi une première liste de personnes et d'organismes auxquels nous allons envoyer notre proposition, en les invitant à venir en discuter lors d'une prochaine réunion.

Quelques travaux de valorisation de la synergie des marégraphes avec des résultats récents de géodésie spatiale ont été entrepris avec la solution ITRF96 du système de référence terrestre international.

La phase de traitement des observations GPS du projet européen EUVN de réseau de référence vertical est désormais achevée. Les résultats ont été présentés lors du symposium EUREF qui s'est tenu du 10 au 12 juin 1998 à Bad Neuenahr-Ahrweiler, en Allemagne. Ils feront l'objet d'une publication spéciale jointe aux Proceedings du symposium. Le groupe de travail EUVN s'est réuni pour définir et organiser la suite des activités, en particulier en ce qui concerne la collecte des données des quelques soixante-quinze marégraphes du projet.

### Perspectives

Les stations de Brest et de Marseille doivent encore faire l'objet des opérations de nivellement et d'étalonnage qui assureront la liaison entre les récepteurs GPS permanents et les marégraphes. L'ensemble des données permettra alors d'évaluer la qualité de ces stations-pilotes. La composante verticale du positionnement par GPS mérite une attention spécifique : l'objet est de fournir un signal géodésique aussi pur que possible pour une exploitation géophysique correcte.



À Marseille, l'expérience réalisée avec deux marégraphes à pression de l'EPSHOM, lors de l'installation du marégraphe acoustique, a soulevé la question de la qualité des données passées du marégraphe centenaire en révélant un filtrage mécanique inattendu. L'IGN a fait nettoyer le chenal d'accès et le puits de tranquillisation du marégraphe en novembre 1998 : soixante centimètres de vase en moyenne gênaient l'accès au puits ! Une nouvelle expérience avec les marégraphes à pression confirmera l'origine du filtrage excessif et permettra enfin de caler les paramètres du marégraphe acoustique. Par ailleurs, la numérisation des marégrammes de Marseille doit se poursuivre par le Service de Géodésie et du Nivellement (SGN). La mise à disposition des données numérisées permettra au SHOM d'effectuer une étude et un contrôle plus détaillés de la qualité des observations passées de Marseille.

D'autres marégraphes d'intérêt scientifique ont d'ores et déjà été identifiés sur le territoire français. Un travail de recension reste toutefois à réaliser. L'examen et l'inventaire détaillés et critiques de la situation actuelle de chacun de ces observatoires sont nécessaires pour identifier les besoins en instrumentation, en contrôles, etc.

Le développement d'une maquette du centre de données SONEL est un objectif prioritaire de 1999 : mise en place de sa structure et adaptation des procédures de collecte du centre global IGS du laboratoire LAREG aux échanges propres à SONEL. Les spécifications techniques sont en cours d'élaboration. Nous devons encore étudier la mise à jour automatique de la base de données ; établir les contrôles de qualité et les niveaux de validation, aussi bien pour les données que pour leurs échanges ; et définir les besoins en traitements pour la production des données spécifiques à SONEL.

Une attention et un effort particuliers doivent être portés aux recommandations en cours d'établissement par les groupes de travail internationaux de GLOSS, d'EOSS, de l'IGS/PSMSL et de l'IAPSO, sur les divers standards et procédures unifiées d'échange et d'analyse des données provenant de la surveillance géodésique des marégraphes. Il faudrait les adopter et les mettre en œuvre dès que possible.

## Publications

[BAKER et al 97] T.F. Baker, P.L. Woodworth, G. Blewitt, C. Boucher & G. Wöppelmann : *A European network for sea level and coastal land level monitoring*, in Journal of Marine Systems, 13 (1997), pp. 163-171, 1997.

[SCHLUETER et al 98] W. Schlueter, J. Adam, W. Gurtner, B.G. Harsson, J. Ihde & G. Wöppelmann : *Report on the Results of the European Vertical Reference Network GPS Campaign'97 (EUVN97)*, rapport joint aux Proceedings du Symposium EUREF, Bad Neuenahr-Ahrweiler (Allemagne), 10-12 juin 1998, 160 pages, 1998.

[WÖPPELMANN et al 98] G. Wöppelmann, S. Allain, C. Boucher, L. Daniel, C. Le Provost & B. Simon : *Présentation du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales - SONEL*, 1998.

[WÖPPELMANN 97] G. Wöppelmann : *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale*, thèse de l'Observatoire de Paris, Ecole doctorale Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, soutenue le 23 juin 1997 à l'ENSG, IGN, 263 pages, 1997.

[WÖPPELMANN 98] G. Wöppelmann : *Marégraphie et géodésie spatiale : bilan d'un travail de recherche sur leur synergie*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 69, 1998.

[WÖPPELMANN et al 96] G. Wöppelmann, C. Boucher & L. Daniel : *Étude d'un Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL)*, rapport d'étude effectuée dans le cadre du programme "Élévation du niveau de la mer" du Ministère de l'Environnement, IGN, publications du laboratoire LAREG, Série Rapport R1, mai 1996.

## C.4.7 Géodynamique et géophysique

Michel Kasser et Thierry Duquesnoy

### Contexte

Depuis la mise au point de la théorie de la tectonique des plaques à la fin des années soixante, de nombreuses mesures des mouvements des plaques ont été effectuées. Au début, cela concernait uniquement les frontières de plaques à cause de la limitation apportée par les techniques employées. L'arrivée de la géodésie spatiale a fourni des données de plus en plus précises, et à des échelles de plus en plus grandes, qui ont pu être utilisées en tectoniques globales.

La thèse soutenue en 1997 par T. Duquesnoy montre combien les mesures de GPS s'avèrent importantes en géodynamique et en géophysique, et plus particulièrement dans l'étude des déformations liées à la sismogénèse.

### Objectifs

L'objectif scientifique majeur est de quantifier dans les meilleures conditions possibles les déformations et les déplacements le long des grands accidents tectoniques comme les failles (en décrochement comme la faille Phillipine et la grande faille de Sumatra) ou les chaînes de collision (les Alpes).

### Suite

Le début de l'année 1998 a été consacré à la publication des résultats géodésiques concernant la partie centrale de la faille de Sumatra. Parallèlement, les traitements de la campagne de mesures de juin 1997 sur la faille

Philippine ont été commencés. Des mesures complémentaires ont été rendues nécessaires et effectuées par une équipe philippine.

En outre, le réseau Alpes installé en 1993 a été remesuré du 24 juin au 6 juillet 1998. Un mois a été nécessaire à l'archivage correct des données. Les traitements de la campagne 1998 ont pu commencer fin septembre et doivent se terminer en mars 1999 par une comparaison des solutions des différents centres de calcul (dont l'IGN) et l'adoption d'une solution combinée.

Ces données sont essentielles pour bâtir :

- un modèle précis des déformations actuelles des Alpes,
- un référentiel géodésique ultra précis pour cette zone de la France.

## Publication

[DUQUESNOY et al 98] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Sébrier, M. Kasser, C. Vigny, I. Bahar, E. Putranto & I. Effendi : *Étude géodésique d'un segment sismique de la Grande Faille de Sumatra (Indonésie)*, in Société Géologique de France, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980015/L-ART, 1998.

## C.4.8 GPS et soutien à l'IGS

Didier Maillard

### Contexte

L'IGS (International GPS Geodynamique Service) est un service scientifique international de support aux activités de géodésie et de géophysique en fournissant des données et des produits GPS.

Ce service, mis en place en 1992 sous l'égide de l'AIG (Association Internationale de Géodésie), est basé sur la participation d'un grand nombre d'organismes de différents pays. Sa structure est constituée en réseaux fonctionnels qui interagissent : un réseau de stations permanentes de poursuite, un réseau de centres de données, un réseau de centres d'analyse et un bureau central qui assure la coordination et la gestion du système. Le tout est chapeauté par un comité de direction qui définit les orientations du service.

Depuis le début en 1992, l'IGN a apporté son soutien à l'IGS. Son engagement est multiple et le laboratoire LAREG (Laboratoire de REcherche en Géodésie) participe à de nombreuses activités de l'IGS :

- le laboratoire LAREG s'est associé avec l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne en Suisse (AIUB), l'IFAG en Allemagne et la Landes Topographie en Suisse pour créer un centre d'analyse de l'IGS : CODE (Center for Orbit Determination in Europe). Celui-ci est installé à l'AIUB à Berne,
- le laboratoire LAREG a aussi développé un centre de données global de l'IGS. Celui-ci est le seul en Europe, les deux autres sont aux USA,
- Claude Boucher est membre du Comité de direction.

### Objectifs

L'objectif le plus important est le développement des calculs de réseaux permanents. Cet objectif est maintenant atteint grâce à l'implantation du réseau GPS permanent en France.

Ce réseau de stations permanentes est calculé en intégrant d'autres stations européennes (en Allemagne, Angleterre, Espagne, Italie, Portugal, Suisse...), nous effectuons donc un traitement journalier sur un ensemble d'une vingtaine de stations. Les résultats intéressent aussi les instances géodésiques européennes, et une partie des sites Français est maintenant intégrée au traitement journalier de la solution Européenne (EUREF).

Le laboratoire LAREG est donc devenu, depuis cette année, centre de données régional pour les stations françaises et un des sept centres régionaux de traitement du réseau européen.

### Suite

Il faut maintenant, maintenir une compétence forte en GPS, ouvrir le centre de calculs vers d'autres applications (géophysique, surveillance, météo etc.) et d'autres utilisateurs (géomètres, topographes etc,...), enfin développer le serveur des données.

Il est de plus indispensable pour ce type de calculs de pouvoir récupérer les observations des différentes stations, de façon continue et automatique, où elles sont disponibles pour les traitements. Le laboratoire LAREG a, en ce domaine, acquis une expérience et une compétence reconnues internationalement. Il doit les maintenir et les développer.

## C.4.9 Repère International de Référence Terrestre (ITRF)

Zuheir Altamimi et Claude Boucher

### Contexte

Cette action de recherche s'inscrit dans le cadre des activités du laboratoire LAREG au sein du Bureau Central du Service International de la Rotation Terrestre (IERS). En effet, le laboratoire LAREG a, au niveau international, la responsabilité de l'établissement, la maintenance et la diffusion du Repère International de Référence Terrestre (ITRF). L'ITRF est la réalisation (ensemble de stations avec leurs positions) du Système International de Référence Terrestre (ITRS). L'idée de base de cette activité de recherche est la combinaison rigoureuse de données de positions et vitesses des stations issues de différentes techniques de géodésie spatiale (VLBI, SLR, GPS et DORIS), dans le but d'établir un repère de référence terrestre *intégrant* les qualités de toutes ces techniques.

### Objectifs

L'objectif principal de cette activité est l'amélioration continue de l'ITRF afin de satisfaire toutes les exigences de qualité des produits scientifiques de l'ITRF, utilisés par la communauté internationale.

Les principales actions menées en 1998 sont :

- publication et promotion de l'ITRF96,
- analyse de qualité de l'ITRF96, et en particulier dans le cadre de son adoption par l'IGS,
- amélioration du logiciel CATREF de combinaison de positions et vitesses des stations de géodésie spatiale,
- spécifications techniques en vue de l'ITRF97,
- analyse des solutions soumises par les centres d'analyse de l'IERS pour l'ITRF97. La figure C.4.9.1 résume les solutions reçues, la figure C.4.9.2 montre la couverture du réseau des stations et la figure C.4.9.3 illustre la qualité des combinaisons par technique des solutions individuelles.

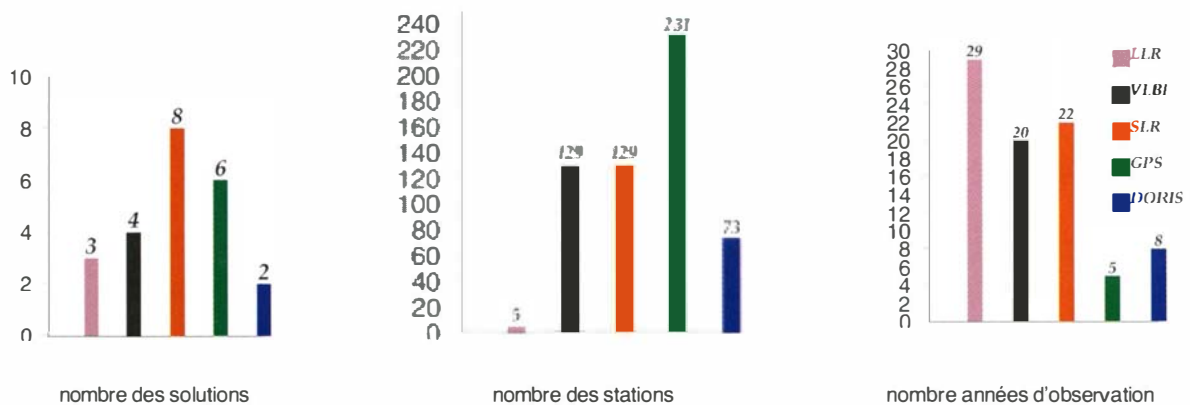


figure C.4.9.1 : données reçues en vue de l'ITRF97

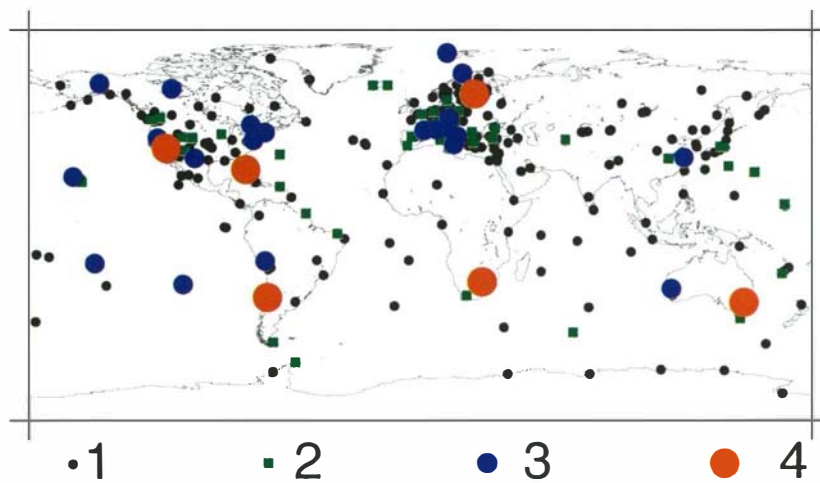


figure C.4.9.2 : répartition des stations de l'ITRF97 et de techniques en colocation par site

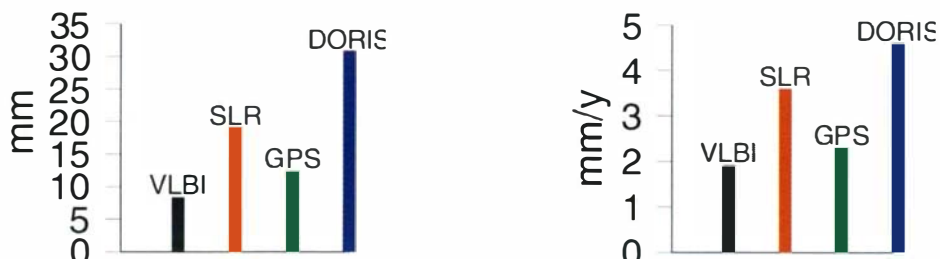


figure C.4.9.3 : erreurs moyennes quadratiques pondérées en position et en vitesse par technique

### Suite

Le calcul de l'ITRF97 est prévu pour la fin de l'année 1998. Une analyse détaillée de cette solution et son apport par rapport à l'ITRF96 seront développés et feront l'objet d'une présentation au meeting AGU en décembre 1998.

### Publications

[ALTAMIMI 98] Z. Altamimi : *IGS reference stations classification based on ITRF96 residual analysis*, in Proceedings of the IGS Analysis Workshop 1998, Darmstadt (Allemagne), IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

[BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *ITRF96 and follow-on for 1998*, Proceedings of the IGS Analysis Workshop 1998, Darmstadt (Allemagne), IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

[BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *Results and Analysis of the ITRF96*, in IERS Technical Note 24, Observatoire de Paris, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

[BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *Contribution de DORIS au système International ITRS*, Journées DORIS'98, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

[SILLARD et al 98] P. Sillard, Z. Altamimi & C. Boucher : *The ITRF96 realization and its associated Velocity Field*, in Geophysical Research letters, vol. 25, n° 17, pp. 3223-3226, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

## C.4.10 Réseau GPS Permanent (RGP)

Claude Boucher

### Contexte

Le Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG) de l'IGN a proposé en 1997 de réaliser une expérience pilote comprenant :

- un réseau,
- un système de collecte, analyse et diffusion de données,
- un ensemble de projets pilotes d'utilisation, définis et mis en œuvre avec divers partenaires.

La mise en place de ce réseau a été découpée en quatre phases :

- Le RGP consiste en un ensemble de stations GPS permanentes couvrant la France métropolitaine. L'acquisition, l'installation et le fonctionnement des stations sont le résultat d'une coopération entre plusieurs organismes.
- Les données GPS une fois collectées sur le serveur du laboratoire LAREG sont, après validation, traitées puis les résultats sont mis à la disposition des utilisateurs par l'intermédiaire du site Web du laboratoire LAREG.
- Ces résultats sont également transmis au centre de calculs Européen pour validation et intégration dans le réseau EUREF (Réseau géodésique Européen).
- La mise en place de ce réseau doit s'accompagner d'une action de sauvegarde topographique et de rattachement aux réseaux existants. Ces opérations devront pouvoir être répétées à intervalles réguliers pour assurer le suivi du site et éventuellement déceler les déformations locales.

### Objectifs

Mettre à la disposition de la communauté scientifique et professionnelle un réseau géodésique d'une nouvelle génération par une connaissance dynamique de ce réseau, indispensable dans de nombreuses applications.

Préparer le futur réseau géodésique actif en installant des récepteurs capables d'évolution et permettant l'émission des corrections de positionnement en temps réel.

## En 1998

### Installation et collecte des données

En octobre 1998 le RGP se compose des stations indiquées par la figure C.4.10.1. Les données sont collectées par plusieurs centres qui effectuent un contrôle qualité puis les acheminent vers le serveur national établi au laboratoire LAREG. Les données sont ensuite mises à la disposition de la communauté par un accès libre. Les procédures de récupération et de transfert des données ont été mises au point cette année.

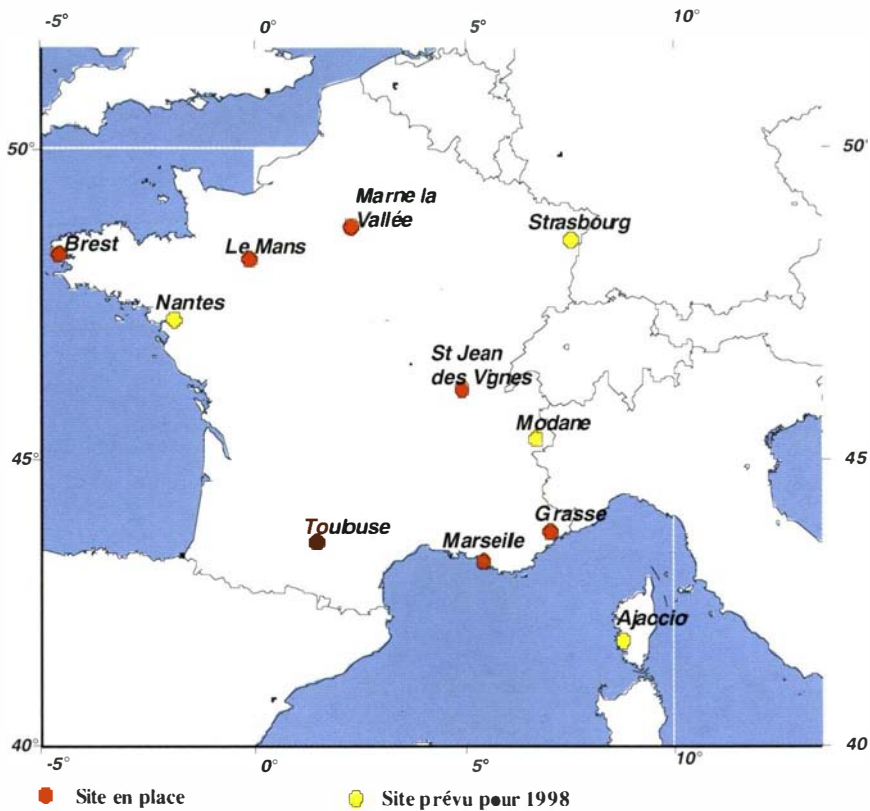


figure C.4.10.1 : carte des sites

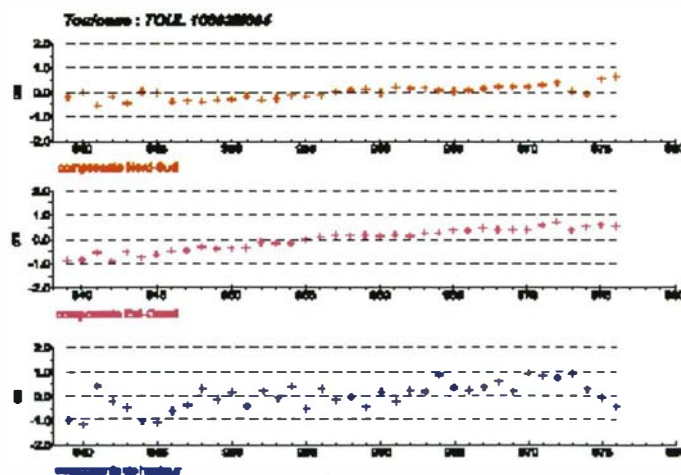


figure C.4.10.2 : exemple de série temporelle

L'automatisation du logiciel de traitement est bien avancée, néanmoins certaines améliorations restent encore à effectuer pour être totalement opérationnel. Les résultats sont mis à disposition des utilisateurs sous la forme de jeux de coordonnées et d'une visualisation graphique de la série.

### *Campagnes d'observations de suivi des sites*

Les prescriptions pour ces travaux sont en cours de définition, quatre sites devraient être observés avant la fin de l'année.

### *Participation aux projets-pilotes*

Pour l'instant, seule l'application de Météo France a vu le jour.

Une autre est en cours de réalisation pour des applications topographiques avec l'OGE, elle ne pourra démarrer qu'après la réception d'une station que nous avons en commande depuis le début de l'année.

Une concertation avec la DRAST et le LCPC est en cours pour l'application DGPS métrique.

### **Suite**

À l'IGN, tous les services utilisent le GPS comme moyen de positionnement, géodésie, stéréopréparation, photogrammétrie, en leur donnant un accès aux données des stations. Un effort doit être fait maintenant pour faire connaître ce réseau à l'intérieur et à l'extérieur de l'IGN

Isabelle Melot

La liste suivante présente les références des publications issues du programme de recherche 1998. Elle reprend les références données dans les différents articles du Bulletin. On peut se procurer les publications en libre diffusion auprès du Service de la recherche :

**Service de la recherche**  
Institut géographique national

2-4 avenue Pasteur  
F-94165 SAINT MANDÉ CEDEX

téléphone : (33) 01 43 98 83 19  
télécopie : (33) 01 43 98 81 71

adresse électronique : [isabelle.melot@ign.fr](mailto:isabelle.melot@ign.fr)

## Thèses de doctorat

[BARRAULT 98] Mathieu Barrault : *Résolution d'un problème à forte combinatoire et présentant un grand nombre de contraintes variées : le placement cartographique des écritures*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, Spécialité : Sciences de l'Information Géographique, laboratoire COGIT, IGN-SR 980012/S-THE, soutenue le 13 novembre 1998.

[HANGOUËT 98] Jean-François Hangouët : *Approche et méthodes pour l'automatisation de la généralisation cartographique ; application en bord de ville*, thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, Spécialité : Sciences de l'Information Géographique, laboratoire COGIT, IGN-SR 980011/S-THE, soutenue le 24 novembre 1998.

[JAMET 98] Olivier Jamet : *Comparaison vecteurs-images pour la détection des changements des bâtiments d'une base de données topographiques*, laboratoire MATIS, IGN-SR 980005/C-THE, soutenue le 11 décembre 1998.

[REGNAULD 98] Nicolas Regnauld : *Généralisation du bâti : structure spatiale de type graphe et représentation cartographique*, thèse de doctorat d'état, Université de Provence Aix-Marseille, laboratoire COGIT, IGN-SR 980010/S-THE, soutenue le 11 mai 1998.

## Articles de journal scientifique

[BADARD, SPÉRY 98] T. Badard & L. Spéry : *Problèmes liés à l'échange et à l'intégration des mises à jour dans les bases de données géographiques*, in *Revue internationale de géomatique*, 18 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980043/S-ART, 1998.

[BAILLARD et al 98] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Detection of buildings and vegetation from aerial stereo pairs : a quality assessment*, in *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (IJPRS)*, laboratoire MATIS, IGN-SR 980003/C-ART, 1998.

[BAILLARD et al 98] C. Baillard, O. Dissard, O. Jamet & H. Maître : *Extraction and Textural Characterization of Above-ground Areas from Aerial Stereo Pairs : a Quality Assessment*, in *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 53, pp. 130-141, laboratoire MATIS, IGN-SR 980024/C-ART, 1998.

[BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser & C. Thom : *A wide-angle airborne laser ranging system for millimetre accuracy subsidence measurements*, in *Journal of Optics*, vol. 29, n° 3, pp. 220-224, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980001/L-ART, juin 1998.

- [BOCK et al 98] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & J. Pelon : *Study of a wide-angle laser ranging system for relative positioning of ground-based benchmarks with millimeter accuracy*, in Journal of Geodesy, 72 : pp. 442-459, Ed : Springer-Verlag, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980007/L-ART, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & J. Pelon : *Multilateration with the wide angle laser ranging system : positioning precision and atmospheric effects*, in Appl. Opt, IGN, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980010/L-ART, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock, C. Thom, M. Kasser & J. Pelon : *Multilateration with the wide angle laser ranging system : ranging performance and first ground-based validation experiment*, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980014/L-ART, 1998.
- [BOCK 99b] O. Bock : *Multilateration with the wide-angle airborne laser ranging system : positioning precision and atmospheric effects*, in Appl. Opt., vol. 38, n° 15, 20 May 1999, laboratoire OEMI, IGN-SR 990002/L-ART, 1999.
- [BORDES et al 98] G. Bordes, G. Giraudon & O. Jamet : *A strategy to use external data in aerial image analysis : use of a cartographic database for automatic road extraction*, in CVIU, IGN, laboratoire MATIS, IGN-SR 980006/C-ART, mai 1998.
- [BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *Results and Analysis of the ITRF96*, in IERS Technical Note 24, Observatoire de Paris, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.
- [CAZENAVE, WILLIS 98] A. Cazenave & P. Willis : *Géodésie, Encyclopaedia Universalis, Dictionnaire des Sciences de la Terre*, Albin Michel, pp. 254-266, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1998.
- [CHEYLAN, RUAS 98] Jean-Paul Cheylan & Anne Ruas : *Éditorial de la revue Mappemonde*, in Mappemonde n° 49, page 1, laboratoire COGIT, IGN-SR 980040/S-ART, février 1998.
- [DE LA LOSA, CERVELLE 99a] Arnaud de la Losa & Bernard Cervelle : *Présentation d'un modèle 3-D et analogies avec un modèle 2-D*, in Revue Internationale de Géomatique (à paraître), IGN-SR 99003/S-ART, 1999.
- [DE LA LOSA, CERVELLE 99b] Arnaud de la Losa & Bernard Cervelle : *Queries and visualization with a 3-D GIS prototype*, in Computers & Graphics (à paraître), IGN-SR 99004/S-ART, 1999.
- [DESEILLIGNY et al 98] Marc Pierrot Deseilligny, Robert Mariani, Jacques Labiche and Rémy Mullot : *Topographic maps interpretation, some proposed strategies*, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1389, pages 175-193, Springer-Verlag, laboratoire MATIS, IGN-SR 980023/C-ART, 1998.
- [DEVOGELE et al 98] T. Devogele, C. Parent & S. Spaccapietra : *On Spatial Database Integration*, in International Journal of Geographical Information Science, vol. 12, n° 4, juin 1998, pp. 335-352, Eds Taylor & Francis Ltd, laboratoire COGIT, IGN-SR 980001/S-ART, 1998.
- [DISSARD, BAILLARD 98] O. Dissard & C. Baillard : *Analyse automatique d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains*, in Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, n° 149, pp. 29-41, laboratoire MATIS, IGN-SR 980004/C-ART, 1998.
- [DUPONT et al 98c] François Dupont, Marc Pierrot Deseilligny et Michel Gondrand : *Automatic Interpretation of scanned maps : Reconstruction of Contour Lines*, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1389, pages 194-206, Springer-Verlag 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980022/C-ART, 1998.
- [DUQUESNOY et al 98] T. Duquesnoy, O. Bellier, M. Sébrier, M. Kasser, C. Vigny, I. Bahar, E. Putranto & I. Effendi : *Étude géodésique d'un segment sismique de la Grande Faille de Sumatra (Indonésie)*, in Société Géologique de France, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980015/L-ART, 1998.
- [HANGOUËT 98] J.-F. Hangouët : *Vers la généralisation automatique*, in Mappemonde n° 49, pp. 6-7, laboratoire COGIT, IGN-SR 980041/S-ART, février 1998.
- [LEMARIÉ, BUCAILLE 98] C. Lemarié & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, in Actes du 11ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, RFIA'98, Clermont-Ferrand (F), 20-22 janvier 1998, vol. 2, pp. 397-406, laboratoire COGIT, IGN-SR 980003/S-COM, 1998.
- [MARIANI et al 98] R. Mariani, M. P. Deseilligny & R. Mullot : *Linear Texture Segmentation using elastic matching : application to geographic map understanding*, in Pattern Recognition, laboratoire MATIS, IGN-SR 980019/C-ART, 1998.
- [MARIANI et al 98] M. P. Deseilligny, R. Mariani, J. Labiche & R. Mullot : *Topographic maps interpretation, some proposed strategies*, in Lecture Notes in Computer Science, n° 1389, pages 175-193, Springer-Verlag, laboratoire MATIS, IGN-SR 980023/C-ART, 1998.
- [RUAS 98] A. Ruas : *OEEPE Working Group on Generalisation*, in News letter 98, laboratoire COGIT, IGN-SR 980004/S-ART, 1998.
- [RUAS 98] A. Ruas : *A method for buiding displacement in automated map generalisation*, in International Journal Geographical Information Science, vol. 12, n° 8, pp. 789-803, laboratoire COGIT, IGN-SR 980045/S-ART, 1998.
- [SILLARD et al 98] P. Sillard, Z. Altamimi & C. Boucher : *The ITRF96 realization and its associated Velocity Field*, in Geophysical Research letters, vol. 25, n° 17, pp. 3223-3226, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.
- [SILLARD 98c] P. Sillard : *GPS, DORIS and SLR combined geocenter motion from reference frame time series analysis*, in IERS technical note 25, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.
- [THOM, SOUCHON 98] Ch. Thom & J.-Ph. Souchon : *Le point sur les cameras numériques de l'IGN*, in Bulletin de la SFPT n° 151, 1998/4, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980016/L-ART, 1998.
- [VAUGLIN 98b] François Vauglin : *Statistical Representation of Relative Positional Uncertainty for Geographical Linear Features*, Data Quality in Geographic Information - From Error to Uncertainty, Michael Goodchild & Robert Jeansoulin (Eds), livre publié par Hermès, pp. 87-96, Paris, laboratoire COGIT, IGN-SR 980028/S-ART, 1997
- [WILLIS 98a] P. Willis : *Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite (DORIS), Report of the DORIS/IERS Coordination for 1997*, 1997 IERS Annual Report, Observatoire de Paris, pp. 1-21-1-28, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1998.
- [WILLIS 98c] P. Willis : *Monitoring geocenter and scale variations using DORIS data, Monthly and weekly comparisons toward ITRF references*, IERS Technical Note n° 25, Observatoire de Paris, 11 pages, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1998.
- [WILLIS et al 98] P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R. Neilan & J. Slater : *International Call for Participation to the IGEX-98 campaign*, in Journal of Geodesy, 72, 5, p. 313, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1998.



## Communications en congrès

- [ALTAMIMI 98] Zuheir Altamimi : *IGS reference stations classification based on ITRF96 residual analysis*, in Proceedings of the IGS Analysis Workshop 1998, Darmstadt (Allemagne), IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.
- [BADARD 98] T. Badard : *Extraction des mises à jour dans les BDG. De l'utilisation de méthodes d'appariement*, in Actes des 3èmes journées Cassini (Cassini'98), Marne-la-Vallée, France, 26-27 novembre 1998, 22 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980037/S-COM, 1998.
- [BADARD 98a] T. Badard : *Mise à jour générique des bases de données géographiques : panorama des problèmes et premières investigations*, in Actes des Première Journées de Ré-ingénierie des Systèmes d'Information, RSI'98, Lyon (F), 1 et 2 avril 1998, pp. 109-118, laboratoire COGIT, IGN-SR 980030/S-COM, 1998.
- [BADARD 98e] T. Badard : *Towards a generic updating tool for geographic databases*, in the Proceedings of GIS/LIS'98, Annual Conference and Exposition, Fort Worth, Texas (USA), November 10-12, 12 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980027/S-COM, 1998.
- [BADARD 98g] T. Badard : *On the automatic retrieval of updates in geographic databases based on geographic data matching tools*, ACI'99, Ottawa (Canada), August 1999, laboratoire COGIT, IGN-SR 980039/S-COM, 1998.
- [BADARD 98h] T. Badard : *On the retrieval of correlation relationships to update geographic databases*, 7th National Conference GIS Research UK, GISRUK'99, University of Southampton (UK), April 14-16, 1999, laboratoire COGIT, IGN, IGN-SR 980044/S-COM, 1998.
- [BAILLARD et al 98] C. Baillard, O. Dissard & H. Maître : *Segmentation of urban scenes from aerial sterea imagery*, ICPR'98, Brisbane (Australie), laboratoire MATIS, IGN-SR 980033/C-COM, août 1998.
- [BAILLARD et al 98b] C. Baillard, O. Dissard & H. Maître : *Segmentation of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery*, in proceedings of the 14th Int. Conf. of Pattern Recognition (ICPR), 16-20 août 1998, Brisbane (Australia), pp. 1405-1407, laboratoire MATIS, IGN-SR 980025/C-COM, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock, Ch. Thom, M. Kasser, and J. Pelon : *Multilateration with the wide angle laser ranging system : ranging performance and first ground-based validation experiment*, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980014/L-COM, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser, and Ch. Thom : *First aircraft experiment with the WA-ALRS*, in Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Deggendorf (Allemagne), 21-25 septembre 1998, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980008/L-COM, 1998.
- [BOCK et al 98] O. Bock, M. Kasser, Ch. Thom & J. Pelon : *Wide-angle airborne laser ranging for precise relative positioning : ground-based experiments and aerial simulations*, in *Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Techniques*, U. Schreiber and C. Werner editors, in Proceedings SPIE 3218, Washington (USA), pp. 92-10, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980013/L-COM, 1998.
- [BOCK, KASSER 98] O. Bock, M. Kasser & C. Thom : *A Wide-Angle Airborne Laser Ranging System for Millimeter Accuracy Subsidence Measurements*, in Proceedings EOS Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements & Applications, Nantes (F), Laboratoire OEMI, IGN-SR 980002/L-COM, juillet 1998.
- [BOICHIS et al 98] N. Boichis, J.-P. Cocquerez & S. Airault : *A Top Down Strategy for Simple Crossroads Automatic Extraction*, in Proceeding of the ISPRS, Commission II Symposium, 32 (2) : 19-26, laboratoire MATIS, IGN-SR 980017/C-COM, 1998.
- [BONIN 98] Olivier Bonin : *Attribute uncertainty propagation in vector geographic information systems : sensitivity analysis*, in Proceedings of 10th International Conference on Scientific and Statistical Database Management, IEEE/Computer Society, Maurizio Rafanelli and Matthias Jarke editors, Capri (I), July 1-3 1998, pp. 254-259, laboratoire COGIT, IGN-SR 980026/S-COM, 1998.
- [BOUCHER 98] C. Boucher : *Scientific applications of GPS and GLONASS : a challenge for GNSS*, présentation invitée, Symposium GNSS, Toulouse, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, octobre 1998.
- [BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *Contribution de DORIS au système International ITRS*, Journées DORIS'98, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.
- [BOUCHER et al 98] C. Boucher, Z. Altamimi & P. Sillard : *ITRF96 and follow-on for 1998*, in Proceedings of the IGS Analysis Workshop 1998, Darmstadt (Allemagne), IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.
- [BUCHER 98] B. Bucher : *Scénarios d'utilisation et ontologie. L'usage des scénarios cognitifs d'utilisation de l'information géographique pour la réalisation d'une ontologie d'opérateurs*, CASSINI'98, 25-26-27 novembre 1998, ENSG, Marne-la-Vallée (F), laboratoire COGIT, IGN-SR 980031/S-COM, 1998.
- [CALMANT et al 98] S. Calmant, A. Cazenave, J.-J. Valette, P. Willis, & Motevas : *Mouvements Tectoniques Verticaux par Altimétrie Satellitaire*, poster présenté aux Journées DORIS, 27-29 Avril 1998, Toulouse (F), laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1998.
- [DANIEL, WÖPPELMANN 98] L. Daniel & G. Wöppelmann : *Towards a national integrated coastal sea-level monitoring system (SONEL) : the data management system*, Symposium INSMAP'98, Melbourne, Floride (USA), du 30 novembre au 4 décembre 1998.
- [DE LA LOSA 98] Arnaud de la Losa : *Towards a 3-D GIS. From 2-D GIS and 3-D CAD, Conception of a 3-D GIS with a Complete Topological Management*, in Proceedings of the 1st International Conférence GIS PlaNET'98, Lisboa (P), september 7-11, laboratoire COGIT, IGN-SR 980021/S-COM, 1998.
- [DESEILLIGNY et al 98] Marc Pierrot Deseilligny, Georges Stamon and Ching Y. Suen : *Veinerization : a new shape descriptor for flexible skeletonization*, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(5) : 505-521, May 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980018/C-COM, 1998.
- [DESEILLIGNY, LE MEN 98] Marc Pierrot Deseilligny & Hervé Le Men : *An algorithm for digital watermark on binary images, applicaton to map abd text images*, in 1998 Symposium on Image, Speech and Signal Processing and Robotics, Hong-Kong, in Proceedings, pages 247-252, September 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980002/C-COM, 1998.
- [DUPONT et al 98a] François Dupont, Marc Pierrot Deseilligny & Michel Gondrand : *Reconstruction automatique des courbes des niveaux à partir de cartes scannées en couleur*, 11ème congrès RFIA, Clermond-Ferrand (F), in Proceedings pages 103-112, laboratoire MATIS, IGN-SR 980020/C-COM, 1998.

- [DUPONT et al 98b] François Dupont, Marc Pierrot Deseilligny & Michel Gondrand : *Automatic Interpretation of contour lines by using external data*, fourth IEEE Workshop on Application of Computer Vision, Princeton (USA), octobre 1998, laboratoire MATIS, IGN-SR 980021/C-COM, 1998.
- [FUCHS, LE MEN 98] F. Fuchs and H. Le Men : *Detecting planar patches in urban scenes*, Workshop on Applications Computer Vision, WACV '98, laboratoire MATIS, IGN-SR 980027/C-COM, 1998.
- [HARVEY et al 98] Francis Harvey, François Vauglin & Atef Bel Hadj Ali : *Geometric Matching of Areas*, 8th International Symposium on Spatial Data handling, Tom Poiker, Nicholas Chrisman, International geographical Union (Eds), Vancouver (Canada), 11-15 July 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980035/S-COM, 1998.
- [KAISTRENKO et al 98] V. Kaistrenko, N. Vasilenko & P. Willis : *The great Shikotan earthquake and tsunami october 4, 1994 and earth crust deformations detected by Topex/Poseidon*, poster présenté aux Journées DORIS, 27-29 avril 1998, Toulouse (F), laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1998.
- [KASSER, BOCK 98] M. Kasser & O. Bock : *A new Way for reducing Biasses in SLR Timing*, 11th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 21-25 septembre 1998, Deggendorf (D), Laboratoire OEMI, IGN-SR 980009/L-COM, 1998.
- [LEMARIÉ, BUCAILLE 98] C. Lemarié & O. Bucaille : *Spécifications d'un module générique d'appariement de données géographiques*, RFIA'98, Clermont-Ferrand (F), 20-22 janvier 1998, in Actes pp. 397-406, laboratoire COGIT, IGN-SR 980003/S-COM, janvier 1998.
- [MOREL et al 98] L. Morel, C. Boucher, J.-P. Berthias & P. Willis : *Terrestrial reference frame differences for Topex/Poseidon and their impact on precise orbit determination*, poster présenté au JASON Science Working Team, Keystone (USA), 12-14 octobre 1998.
- [MOREL, WILLIS 98] L. Morel & P. Willis : *Preliminary invetsigation on erroneous ITRF stations coordinates of the DORIS tracking network*, poster présenté au JASON Science Working Team, Keystone (USA), 12-14 octobre 1998.
- [MUSTIÈRE 98] S. Mustière : *GALBE : Adaptative Generalisation, the Need for an adaptative Process for automated Generalisation, an Example on Roads*, GIS PLANET'98, Lisbonne (P), 7-11 septembre 1998 laboratoire COGIT, IGN-SR 980024/S-COM, 1998.
- [MUSTIÈRE 98] S. Mustière : *Legibility detection : a necessary tool for Geographic Information Systems*, Intercarto'98, Barnaul (Russie), laboratoire COGIT, IGN-SR 980029/S-COM, 1998.
- [RUAS 98] Anne Ruas : *OO-Constraint modelling to automate urban generalisation process*, in Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data Handling, pp. 225-235, juillet 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980042/S-COM, mai 1998.
- [SCHLUETER et al 98] W. Schlueter, J. Adam, W. Gurtner, B.G. Harsson, J. Ihde & G. Wöppelmann : *Report on the Results of the European Vertical Reference Network GPS Campaign'97 (EUVN97)*, rapport joint aux Proceedings du Symposium EUREF, Bad Neuenahr-Ahrweiler (Allemagne), 10-12 juin 1998, 160 pages, 1998.
- [SLATER et al 98] A. Slater, P. Willis, W. Gurtner, C. Noll, G. Beutler, G. Hein & R.-E. Neilan : *The International GLONASS Experiment (IGEX-98)*, in Proceedings of the Institute of Navigation, ION GPS'98, Nashville (USA), 7 pages, septembre 1998.
- [VAUGLIN 98a] François Vauglin : *Qualité des bases de données géographiques*, Journées Recherche de l'IGN. Saint-Mandé (F), 4-5 mai 1998, laboratoire COGIT, IGN, 1998.
- [VAUGLIN 98c] François Vauglin : *Use of Variograms to Represent Spatial Uncertainty for Geographic Linear Features*, Third International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Québec (Canada), 20-22 mai 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980034/S-COM, 1998.
- [VAUGLIN, BEL HADJ ALI 98] F. Vauglin & A. Bel Hadj Ali : *Geometric matching of polygonal Surfaces in GISs.*, APRS-RTI Annual Conference, Tampa, FL (USA), pp. 1511-1516, 30 mars-4 avril 1998, laboratoire COGIT, IGN-SR 980032/S-COM, 1998.
- [WILLIS et al 98] P. Willis, Y. Bar-Sever, E. Doerflinger & J. Zumberge : *Using DORIS data for determining the tropospheric delay : Implications on climatology and meteorology*, in Actes des Journées DORIS, 27-29 avril 1998, Toulouse (F), 9 pages, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1998.
- [WILLIS 98] P. Willis : *Comparison of the CNES and NASA reference systems with the ITRF reference*, JASON Science Working Team, Keystone (USA), 12-14 octobre 1998.
- [WILLIS 98b] P. Willis : *DORIS/IERS Processing at IGN : global solutions and time series*, IERS Workshop, Potsdam (Allemagne), 28 septembre - 2 octobre 1998, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1998.
- [WÖPPELMANN et al 98] G. Wöppelmann, B. Simon & P. Willis : *Tide gauge trends and DORIS vertical movement estimations : towards a comprehensive sea level study*, Symposium INSMAP'98, Melbourne, Floride (USA), du 30 novembre au 4 décembre 1998.
- [WÖPPELMANN 98] G. Wöppelmann : *Marégraphie et géodésie spatiale : bilan d'un travail de recherche sur leur synergie*, in Bulletin d'Information de l'IGN n° 69, 1998.
- [WILLIS et al 98] P. Willis, W. Gurtner, G. Beutler, G. Hein, R. Neilan & J. Slater, *IGEX : International GLONASS Experiment, Scientific objectives and preparation*, COSPAR assembly, Nagoya (Japon), juillet 1998, in Advance Space Research, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, 1998.
- [WILLIS, SILLARD 98] P. Willis & P. Sillard : *Weekly solutions for stations coordinates : early results and perspectives*, in Actes des Journées, 27-29 Avril 1998, Toulouse (F), 9 pages, laboratoire LAREG, IGN-ENSG, 1998.

## Rapports de stages

- [BONANNI 98] L. Bonanni : *Établissement de liens de corrélation dans un but de mise à jour des bases de données géographiques*, mémoire de DEA, Systèmes Intelligents, Université Paris-9 Dauphine (F), 65 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980017/S-STA, 29 septembre 1998.
- [CARTRON 98] H. Cartron : *Détection des routes dans les images satellites à haute résolution*, DESS IASV (Informatique Appliquée aux Sciences de la Vie), laboratoire MATIS, IGN-SR 980011/C-STA, 23 septembre 1998.
- [CLOSMENIL 98] S. Closmenil : *Modélisation du concept AGENT pour la généralisation automatique*, DESS appliqué aux Sciences de la Terre, Paris-5, laboratoire COGIT, IGN-SR 980038/S-STA, le 28 octobre 1998.
- [DEPPEN 98] I. Deppen : *Traitement d'une campagne GPS monofréquence*, DESS de surfaces et sub-surfaces, Institut de Physique du Globe de Paris, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980006/L-STA, octobre 1998.
- [FLEURY 98] D. Fleury : *Implémentation d'un modèle géographique 3-D*, DESS Génie des logiciels applicatifs, Paris-6, 59 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980018/S-STA, 17 septembre 1998.
- [GRUEL 98] N. Gruel : *Positionnement géodésique avec le système PRARE*, rapport de stage de DEA : Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, Observatoire de Paris, IGN, ENSG, laboratoire LAREG, juin 1998.
- [JIBRINI 98] H. Jibrini : *Fabrication de modèle d'élévations dense en zone urbaine : correction des données sur les zones homogènes et les occlusions*, rapport de stage du DEA Informatique Fondamentale et Applications, Université de Marne-La-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 980012/C-STA, 1998.
- [MASCARÉNAS 98] E. Mascarénas : *Modélisation et extraction automatique des ronds-points dans les images aériennes*, rapport de stage du DESS de Mathématiques appliquées, Université Paris-6, laboratoire MATIS, IGN-SR 980014/C-STA, août 1998.
- [MAYER 98] D. Mayer : *Fusion de résultats de corrélation*, rapport de stage du DEA Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 980013/C-STA, 1998.
- [OMRANE 98] N. Omrane : *Étude de la résolution de la BDCarto*, DEA SIG, Université de Marne-la-Vallée-ENSG-ENST, laboratoire COGIT, IGN-SR 980016/S-STA, 4 septembre 1998.
- [OUDINE 98] C. Oudine : *Mise en correspondance d'images : construction automatique du tableau d'assemblage d'un bloc de prise de vues*, rapport de stage de l'Université René Descartes, DESS IASV (Informatique Appliquée aux Sciences de la Vie), laboratoire MATIS, IGN-SR 980016/C-STA, septembre 1998.
- [RAJAONARISON 98] J.-D. Rajaonarison : *Appariement de points d'intérêt dans N images : application à la mesure automatique de points de liaison multiples pour l'aérotriangulation*, rapport de stage, DEA SIG Université de Marne-La-Vallée, laboratoire MATIS, IGN-SR 980010/C-STA, 1998.
- [SANCHEZ 98] M. Sanchez : *Étude d'un algorithme de propagation de rayons pour la reconnaissance de routes*, rapport de stage de DESS Intelligence Artificielle, laboratoire MATIS, IGN-SR 980015/C-STA, septembre 1998.
- [VIALLET 98] B. Viallet : *Étude de la réception d'un télémètre laser aéroporté*, INSA, Laboratoire OEMI, IGN-SR 980004/L-STA, 15 juillet 1998.

## Rapports internes et comptes rendus

- [AFFHOLDER 98] J.-G. Affholder : *Points d'inflexion et sommets d'une polygonale*, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 980022/S-RAP, février 1998.
- [AFFHOLDER 98] J.-G. Affholder : *Généralisation du linéaire : une approche nouvelle*, rapport interne, laboratoire COGIT, IGN-SR 980023/S-RAP, 1998.
- [BADARD 98c] T. Badard : *Extraction de différentiels de mise à jour sur une base de données géographiques à partir de méthodes d'appariement - tests avec la BD Carto sur la zone de Dinan*, rapport technique, 11 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980013/S-RAP, 6 juillet 1998.
- [BADARD 98] T. Badard : *Extraction des différentiels de mise à jour sur une base de données géographiques à partir de méthodes d'appariement - Test avec la BDCarto sur le département du Calvados (14)*, laboratoire COGIT, IGN-SR 980025/S-RAP, 9 septembre 1998.
- [BADARD 98c] T. Badard : *Premières pistes pour une mise à jour générique des bases de données géographiques*, in Bulletin d'information de l'IGN n° 69 (1998/2), pp. 25-32, laboratoire COGIT, IGN, 1998.
- [BRANCHU 98] S. Branchu : *Rapport de tests du logiciel TopAéro-PC*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980030/C-RAP, octobre 1998.
- [CHIRIÉ 98] F. Chirié : *Dossier de conception : programme de placement automatique des noms de rues " PANR "*, laboratoire COGIT, IGN-SR 980020/S-RAP, 1998.
- [FUCHS et al 98] F. Fuchs, F. Jung & Y. Wehrstedt : *Chaîne de calcul de points de liaison automatiques pour l'aérotriangulation des prises de vues des caméras numériques*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980031/C-RAP, 1998.
- [FUCHS 98] F. Fuchs : *Croissance de régions par approximations planes. Application à la détection de primitives 3-D planes*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980026/C-RAP, février 1998.
- [JUNG 98] Franck Jung : *Présentation d'une technique de focalisation sur des zones de changements appliquée à la thématique bâti*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980028/C-RAP, 1998.
- [LECORDIX 98] F. Lecordix : *De la recherche à la production : le placement automatique des écritures horizontales*, rapport EVAFI, laboratoire COGIT, IGN-SR 980015/S-RAP, mai 1998.
- [LEMARIÉ 98] C. Lemarié : *Comparaison de deux versions successives de la BD Topo - Test sur la zone d'Angers*, rapport technique, laboratoire COGIT, 13 pages, laboratoire COGIT, IGN-SR 980036/S-RAP, 4 mars 1998.

- [LEMARIÉ 98] C. Lemarié : *Synthèse sur les représentations multiples*, rapport technique, laboratoire COGIT, IGN-SR 980044/S-RAP, 18 décembre 1998.
- [VAUGLIN 98] F. Vauglin : *Qualité des bases de données géographiques*, Journée Recherche IGN, 4-5 mai 1998, laboratoire COGIT, IGN, 1998.
- [WEHRSTEDT 98] Y. Wehrstedt : *Aérotiangulation d'une prise de vue aérienne réalisée par la caméra numérique*, laboratoire MATIS, IGN-SR 980007/C-RAP, janvier 1998.
- [WEHRSTEDT 98] Y. Wehrstedt : *Présentation de l'aérotiangulation implémentée dans TopAéro-PC*, IGN-SR 980009/C-RAP, laboratoire MATIS, mars 1998.
- [WEHRSTEDT 99] Y. Wehrstedt : *Orthophoto de la ville de Rennes par caméra numérique couleur*, compte rendu de production de la filière photogrammétrique, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 990018/C-RAP, 1999.
- [WEHRSTEDT, BRANCHU 98] Y. Wehrstedt & S. Branchu : *TopAéro-PC : Modélisation des données d'un système d'aérotiangulation automatisé*, rapport interne, laboratoire MATIS, IGN-SR 980029/C-RAP, août 1998.
- [WILLIS 98d] P. Willis : *Geodetic and Geophysical applications of the DORIS/ENVISAT data within the International Earth Rotation Service*, proposition ENVISAT à l'Agence Spatiale Européenne, IGN-ENSG, laboratoire LAREG 98.396, juin 1998.
- [WÖPPELMANN et al 98] G. Wöppelmann, S. Allain, C. Boucher, L. Daniel, C. Le Provost & B. Simon : *Présentation du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales - SONEL*, IGN-ENSG, laboratoire LAREG, 1998.

## Manuels et documentation

- [CHIRIÉ 98] F. Chirié : *Manuel utilisateur : programme de placement automatique des noms de rues " PANR "*, version provisoire, laboratoire COGIT, IGN-SR 980019/S-MAN, 1998.
- [WEHRSTEDT 98b] Y. Wehrstedt : *TopAéro-PC : Manuel utilisateur*, laboratoire MATIS, IGN-SR 980008/C-MAN, mars 1998.

Directeur de la Publication : Jacques Poulain  
Rédacteur en Chef : Serge Motet

Imprimé à l'IGN

© Institut Géographique National

136 bis rue de Grenelle  
F-75700 Paris 07 SP

Tél. 01.43.98.80.00

