

xvz

Éditée par l'
Association
Française de
Topographie
n°108

Mise en œuvre de l'arrêté sur les classes de précision Retour d'expérience de la Ville de Nice

- topographie
- géodésie
- photogrammétrie
- SIG
- géomatique
- métrologie
- hydrographie
- topométrie
- cartographie
- génie civil
- histoire

**Prix AFT 2005
Les résultats**

Directeur des publications

André Bailly
Ingénieur Géomètre ETP

Directeur adjoint des publications

Emmanuel Natchitz
Enseignant-Chercheur ESTP

Rédaction et administration XYZ

2, avenue Pasteur
94165 Saint-Mandé Cedex
Tél. : 01 43 98 84 80
Fax : 01 43 74 72 80
secrétariat: tous les jours de 9 h à 17 h

Rédacteur en chef

Jean-Pierre Maillard
Urbaniste, Géomètre-Expert Foncier,
Marne-la-Vallée

Comité de Rédaction

Stéphane Durand
Enseignant-Chercheur
ESGT Le Mans
Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg
Michel Kasser
Directeur ENSG
Marne-la-Vallée
Tania Landes
Maître de Conférences
INSA de Strasbourg

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

Chantal Holdrinet
aft78@wanadoo.fr
Tél. : 01 39 53 98 93

Conception et maquette

Dorothée Picard

Abonnements : Evelyn Chevalier

Autre publication : L'annuaire de l'AFT

IMPRIMERIE MODERNE USHA

137, avenue de Conthe
BP 337 15003 Aurillac Cedex
Tél. : 04 71 63 44 60
Fax: 04 71 64 09 09

Dépôt légal

2^e trimestre 2006 ISSN 0290-9057
N° CPPAP: 01 11 G 80 866

Tirage de ce numéro : 1600 ex

Abonnement annuel

France CEE: 73 €
Etranger (avion, frais compris): 76 €
Les règlements payés par chèques
payables sur une banque située hors
de France doivent être majorés de 10 €
Le numéro: 20 €
Le bulletin d'adhésion est en p.75
Membre du SPCS Syndicat de la Presse
Culturelle et Scientifique

L'AFT n'est pas responsable des opinions
émises dans les conférences qu'elle organise
ou les articles qu'elle publie. Tous droits de
reproduction ou d'adaptation strictement
réservés.

Photo de couverture :
© Photo ville de Nice

Septembre 2006 • 3^e trimestre

Sommaire

La revue XYZ est éditée par l'Association Française de Topographie (AFT)

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres) 
2, avenue Pasteur - 94165 Saint-Mandé Cedex - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax: 01 43 74 72 80

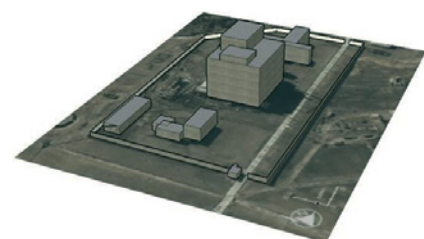
Courriel : info@aftopo.org • Site Internet : <http://www.aftopo.org>

■ Editorial 5

■ Info-Topo

> Les informations de la profession..... 6

■ Résultats du Prix AFT 2005



Proposition de chaîne opérationnelle
de reconstruction 3D de sites à partir
de données spatiales ou aéroportées

Hervé DAUDIGNY 13



> Photogrammétrie
et muséologie
Les Sèvres du musée
de Rouen
Sébastien VAREA 20

> Réalisation d'un système de stéréovision
mobile routier
Nicolas JANVIER 28

■ Règlementation



Mise en œuvre de l'arrêté sur les classes
de précision - Retour d'expérience
de la Ville de Nice

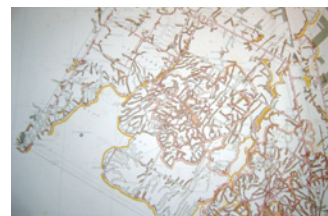
Ludovic ANDRES 28

■ Géodésie

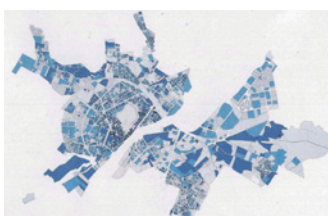
> Choix optimal d'un modèle analytique
de covariance pour la validation
des mesures gravimétriques par
la méthode de Collocation
(Application : Nord de l'Algérie)

BENAHMED DAHO S. A. - SAHEL C.
ZEGGAI A. 47

■ Histoire



> Les dessous de Paris "Cartes sur table" (2^e partie)
Gilles THOMAS 55



> Le cadastre espagnol : mise en place,
utilisations et limites
Hélène TESSON 63

■ Topo vécue

> Pots de vins et peaux de banane
Robert Chevalier 67

■ Art et Géométrie



> Palais-Royal : Bury
côté cour, Honegger
au jardin
Jean-Pierre MAILLARD
..... 70

■ Livres 72

■ GSF

> "Le monde est un théâtre, la vie est une
comédie : tu rentres, tu vois et tu sors."
> "Aza ny hafahezan'ny andro no alaina,
fa ny halavan'ny taona heverina"
François BODIN 78

Pour la recherche de nos annonceurs
consulter la page 73.

DANS LE PROCHAIN NUMÉRO D'XYZ - 109 :

> 3^e prix ex aequo de l'AFT : Pauline Lucas
Création de photomodèles adaptés à
l'étude des fronts rocheux

A chaque numéro le sommaire d'XYZ montre l'étendue des domaines recouverts par ce qu'il pourrait utilement être appelé un jour la topomatique et la diversité des sujets traités.

On se déplace dans le temps : la rubrique Histoire rappelle les réalisations et les apports du passé, les chapitres techniques présentent les pratiques et les expériences d'actualité, enfin les annonces et les libres propos préparent à l'avenir.

On voyage dans l'espace : les articles conduisent presque toujours en un lieu, qu'il soit en France ou dans le monde et, par GPS interposé, bien au-delà du globe habité.

Le dit sommaire précise le nom des auteurs auxquels une large reconnaissance est due car XYZ existe grâce à eux. Ils sont d'autant plus méritants qu'ils y contribuent de façon désintéressée, la revue étant une publication associative.

Pour une fois, il est proposé de s'intéresser à eux, tous aussi différents les uns des autres.

On trouve la signature de personnalités bien connues du métier, de professeurs de l'enseignement supérieur, de praticiens qui se risquent à l'écriture, des annonceurs qui font un effort de pédagogie pour faire connaître l'évolution des matériels et des moyens informatiques dédiés à la topographie, de retraités qui partagent leurs savoir-faire, leurs passions et leurs expériences, ou encore d'étudiants prometteurs dont les travaux de fin d'études sont validés par leurs directeurs.

Ces derniers rédacteurs sont particulièrement à l'honneur dans ce n° 108 puisqu'il contient le palmarès du prix AFT 2005 et les articles correspondants. A ce sujet, le conseil d'administration de l'AFT a récemment décidé, au delà des élèves des quatre écoles spécialement dédiées la profession, l'ENSG, l'ESTP, l'INSA de Strasbourg et l'ESGT, d'ouvrir aux candidats qui présentent le DPLG, notamment ceux formés par l'ECOLE CHEZ SOI, la faculté de concourir au prix AFT et ce, dès l'édition 2007.

Avec l'âge et la compétence des auteurs, il est tout aussi intéressant de constater la multiplicité de leurs nationalités. Pour s'en tenir aux cinq derniers numéros, des patronymes et autant d'articles renvoient à l'Algérie, à l'Allemagne, à la Belgique, au Brésil, au Canada, aux Etats-Unis, à l'Iran, au Liban ou encore à la Suisse sans d'ailleurs être sûr de n'en pas oublier. Des français de l'étranger n'hésitent pas non plus à se mobiliser pour informer de ce qui se passe dans le pays où ils travaillent. XYZ apporte ainsi une contribution significative à la francophonie dans un domaine scientifique et technique dominé par l'anglais.

Sans fausse modestie on doit s'en féliciter.

Jean-Pierre Maillard

■ par Raymond D'HOLLANDER

On considère deux cercles (c) et (c') de centre o et o' et de rayons R et R' extérieurs l'un à l'autre.

Soit d la distance de leurs centres : $d = oo'$, tel que $d > R + R'$

1 On demande de construire une droite (Δ) tangente au point T au cercle (c), coupant le cercle (c') en deux points A et B tels que la corde AB soit égale au côté de l'hexagone régulier inscrit dans le cercle (c').

2 Soit (Δ) une deuxième tangente au point T' au cercle (c), coupant le cercle (c') en deux points A' et B' tels que la corde A'B' soit égale aussi au côté de l'hexagone régulier inscrit dans le cercle (c'), A'B' n'étant pas consécutif au côté AB. Construire cette tangente Δ' .

3 Montrer que la solution du problème entraîne la condition nécessaire et suffisante :

$$3d^2 = 4R^2 + R'^2$$

4 Montrer que la corde TT' du cercle (c), est celle du côté de l'hexagone régulier inscrit dans le cercle (c')

La solution de cette récréation sera donnée dans le prochain numéro d'XYZ.

DECOUVREZ NOTRE NOUVEAU SITE MARCHAND... LE PORT EST GRATUIT*

www.lepont.fr

- Commandez directement sur le site
- Tous nos produits sont en ligne
- Connectez-vous et commandez quand vous le souhaitez...
- C'est vous qui décidez !
- Promotions et exclus web

*Je choisis, je clique, je commande...
et je suis livré sous 48 h**

**LEPONT ...
SIMPLICITÉ,
EFFICACITÉ**

Rue Copernic - 38670 CHASSE SUR RHÔNE
Tél. 04 72 49 26 40 - Fax 04 72 49 26 46
www.lepont.fr

51, bd Maréchal Foch - 38100 GRENOBLE
Tél. 04 76 96 67 74 - Fax 04 76 70 00 89
www.lepont.fr

* Partout en France métropolitaine (sauf Corse) pour une commande internet passée sur le site (minimum 190 €), dans la limite des stocks disponibles et sous les conditions de vente habituelles (détail sur le site ou gratuit sur simple demande).

Résultats du Prix AFT 2005

Mesdemoiselles les candidates,
Messieurs les candidats,

... au prix de l'AFT 2005

En tant que Président de l'Association Française de Topographie, j'ai l'honneur de vous communiquer les noms des lauréats du Prix AFT 2005, pour lequel vous nous avez adressé un dossier de candidature.

Le premier prix est attribué à Hervé Daudigny (600 euros)

Le deuxième prix à Sébastien Varea (400 euros)

Nous n'avons pas pu départager les deux candidats suivants, de sorte que nous avons deux ex-aequo pour le 3^e prix :
Pauline Lucas et Nicolas Janvier (250 euros chacun).

Ces prix seront remis le mercredi 4 octobre 2006 (au courant de l'après-midi) à l'occasion des Journées de la Topographie à l'INSA de Strasbourg, et les articles correspondants sont publiés dans xyz : ceux d'Hervé Daudigny, de Sébastien Varea et de Nicolas Janvier dans le présent numéro, celui de Pauline Lucas et un résumé présentant les sujets proposés non primés dans le n°109.

Je me permets de féliciter l'ensemble des candidats pour l'excellente qualité des travaux qui nous ont été soumis, ce qui a d'ailleurs rendu assez délicat le classement. Le jury était composé de Nicolas Balard, Franck Jung, Tania Landes et moi-même, assistés de Pierre Grussenmeyer, Mathieu Koehl et Emmanuel Natchitz.

Avec mes remerciements à toutes et tous, et mes félicitations aux lauréat(e)s.

Michel Kasser
Président de l'AFT

Pour le prix 2006, il est rappelé que la date limite de dépôt des dossiers est le 1^{er} octobre 2006, les consignes aux auteurs étant téléchargeables sur le site internet de l'AFT : <http://www.aftopo.org>

Proposition de chaîne opérationnelle de reconstruction 3D de sites à partir de données spatiales ou aéroportées

■ Hervé DAUDIGNY

Le projet a été réalisé à la Direction du Renseignement Militaire et a pour but de répondre aux besoins des Armées en terme de reconstruction 3D de sites. L'objectif de l'étude est de proposer une chaîne opérationnelle de reconstruction tridimensionnelle de sites à partir de données spatiales ou aéroportées, en utilisant les données disponibles et selon les impératifs des cycles opérationnels. Afin d'atteindre ces objectifs, deux méthodologies de reconstruction ont été proposées : une méthodologie en mode monoscopique et une méthodologie en mode stéréoscopique. Pour tester ces dernières, des modélisations ont été menées, une chaîne de reconstruction s'articulant autour des deux méthodologies a pu être proposée.

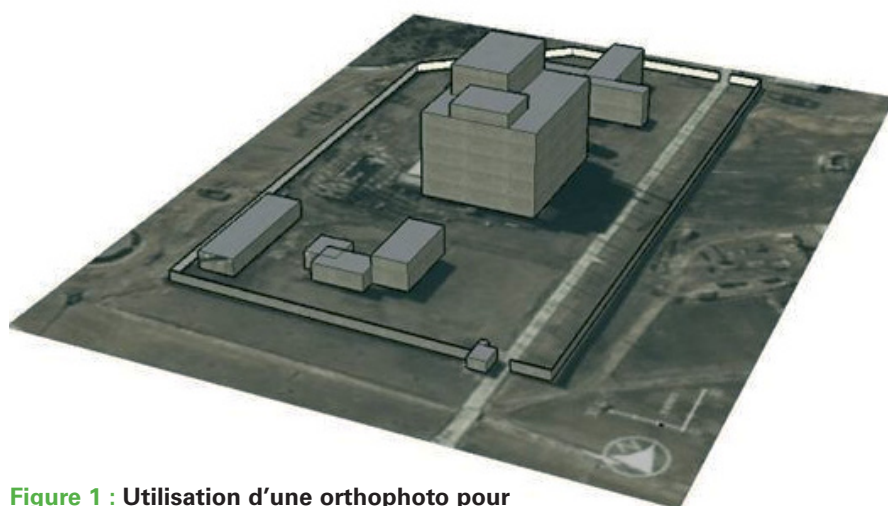


Figure 1 : Utilisation d'une orthophoto pour la modélisation de la centrale nucléaire de 50MW de Yong Byon (Corée du Nord).

selon le vieil adage médiéval : Savoir, c'est pouvoir. De manière à aider à la réalisation des missions des organismes de la Défense, de nouvelles techniques dans la collecte et l'utilisation du renseignement peuvent se révéler utiles. En particulier, l'apport de la troisième dimension n'est pas à négliger.

Un contexte géopolitique complexe

Le nouveau contexte géopolitique apparu au début des années 1990 avec la disparition du pacte de Varsovie, et plus encore dans le contexte "post 11 Septembre", a mis en lumière le fait que les Forces pouvaient dorénavant être confrontées à un environnement impré-

visible et en constante évolution, si bien qu'il est de plus en plus difficile de parler de nouvel équilibre mondial. Les crises se diversifient tout comme les risques. L'émergence de nouvelles puissances (civiles ou militaires), la montée du terrorisme ainsi que le développement de conflits locaux posent de nouveaux problèmes pour les organismes de la Défense. Ces derniers voient leurs missions modifiées. Ils doivent désormais être capables d'effectuer une veille précise, d'anticiper ou de suivre plusieurs crises simultanément (veille globale) et d'aider à leurs résolutions.

La capacité de disposer d'une chaîne de renseignement articulée et complète est devenue un enjeu de puissance d'une dimension équivalente, si ce n'est supérieure, à celle obtenue par la pos-

Que ce soit dans l'art de la guerre de SunTzu ou dans les traités de géopolitiques actuels, le renseignement y est mentionné comme l'une des clés maîtresses pour la résolution (pacifique ou non) de conflits. En effet,

■■■ session du pouvoir destructeur de l'armement. D'après Rousselin [2002], la connaissance du terrain sur lequel se dérouleront les opérations conditionne leur succès ; les Armées doivent être capables de recueillir, traiter et diffuser les informations géographiques nécessaires au bon fonctionnement des systèmes de commandement et des systèmes d'armes qui équipent les Forces engagées.

Un cadre d'étude particulier

Le Projet de Fin d'Etudes a été réalisé à la Direction du Renseignement Militaire en partenariat avec la société Latitude Geosystems. La Direction du Renseignement Militaire réalise notamment des études dans le domaine du renseignement image et électromagnétique de manière à pouvoir répondre aux besoins opérationnels des Armées à plus ou moins long terme. Le Projet de Fin d'Etudes se place dans ce cadre et a pour objectif de répondre aux besoins des Armées en terme de reconstruction 3D de sites. Le sujet proposé émane à la fois d'une volonté de prospective "entrevoir les possibles" et d'obtention de réponses face aux besoins actuels et futurs des Armées.

Objectif et problématique

L'objectif de l'étude est de proposer une chaîne opérationnelle de reconstruction tridimensionnelle de sites, en utilisant les données disponibles et selon les délais de réalisation compatibles avec les impératifs des cycles opérationnels. De plus, les modèles 3D réalisés avec cette chaîne doivent pouvoir être utilisés rapidement par tout type de personnes qu'elles soient spécialistes ou non de la manipulation de données géographiques et informatiques. L'objectif majeur pour la Direction du Renseignement Militaire est donc de conserver sa capacité à détenir et à maîtriser l'information géographique et cela en couvrant le domaine de la 3D.

Les cycles opérationnels

La période d'action globale au sein des Armées peut être définie en trois cycles opérationnels : le cycle à chaud, le cycle à froid et le cycle veille.

Le cycle à chaud correspond à un cycle opérationnel à court terme, dans le cadre d'une action en cours dans un contexte d'urgence opérationnelle. Une action de renseignement est menée sur un site militaire ou d'intérêt militaire. Dès réception des données de cette action, il faut pouvoir répondre dans les meilleurs délais afin de permettre de préparer la mission qui sera menée sur cet objectif.

Le cycle à froid se caractérise par un contexte à plus long terme (inférieur à une semaine), dans le cadre d'une planification d'opérations par exemple (constitution d'une strike list (liste d'objectifs) potentiels à traiter en cas de frappes aériennes). Dans ce cycle, les objectifs majeurs "à frapper" sont définis, la zone d'action est privilégiée.

Le cycle veille a pour objectif de traiter des sites à caractère sensible à long terme (quelques mois) soit dans le cadre d'une planification préventive (ciblage) soit dans le cadre de surveillance particulière (contre prolifération). La connaissance précise de sites militaires ou d'intérêts militaires pourrait se révéler précieuse à plus long terme. Ce cycle se place dans le contexte d'une évaluation des risques potentiels, ou de planification stratégique.

A la vue de ces différents cycles, il a été nécessaire en début de projet de réaliser une étude des besoins en fonction des cycles opérationnels.

En résumé, lorsque l'on passe d'un cycle à chaud vers un cycle veille, le temps disponible pour la modélisation augmente, on pourra également utiliser des données de plus en plus détaillées ce qui permettra de réaliser des modèles complexes et étendus autour du site militaire ou d'intérêt militaire à modéliser.

Les données

Dans le cadre d'un projet de type Défense, les données peuvent être variées : les données environnement (modèles numériques de terrain, modèles numériques d'élévation), les données image (images aériennes, images satellites, couples stéréoscopiques d'images aériennes ou spatiales, images terrestres), les données exogènes (cartes, plans, analyses, informations diverses).

Il faut souligner que l'on se place dans un cadre opérationnel, ce qui signifie qu'il est très rarement possible de disposer d'un lot de données exhaustif et parfaitement apte à un rendu parfait, et encore moins de vérité terrain, comme c'est le cas dans le cadre d'un projet du type "industriel". Il s'agit donc d'adapter les méthodologies de reconstruction proposées aux données disponibles et à leur degré de précision.

	Cycle à chaud	Cycle à froid	Cycle veille
Besoins	Rapide (1 à 3 heures)	En 1 à 7 jours	Quelques semaines voire quelques mois
Modélisation	Grossière du bâti	Fine du bâti	Fine du bâti
Niveau de détail	Une limitation du modèle à la mission	Une extension de la modélisation autour du site	Une extension de la modélisation autour du site
Données	Non détaillées	Détaillées	Détaillées et complexes

Figure 2 : Analyse du besoin en fonction des cycles opérationnels.

Recherche et proposition

■ Critères à respecter :

La modélisation devra pouvoir se présenter sous trois formes : la modélisation du bâti uniquement, la modélisation de l'environnement uniquement, la réunion de la modélisation du bâti et de l'environnement. Cette modélisation doit répondre à certains critères. Le premier concerne la facilité d'emploi des logiciels pour la modélisation du site. L'opérateur doit en effet être capable de recréer facilement un site sans avoir eu une formation approfondie ou être un véritable spécialiste de modélisation par informatique. Ce choix s'explique par les difficultés liées à la formation des interprètes d'images et des analystes. La modélisation doit être vue comme un outil complémentaire du métier d'interprète ou d'analyse et non pas comme une nouvelle fonction à pourvoir.

Parallèlement, la modélisation doit permettre la prise en compte de données multi-sources et l'intégration directe ou indirecte de ces dernières, ainsi qu'une réalisation minimale (mais pertinente) en cas de manque de données adéquates. Ensuite, le modèle créé doit permettre une interprétation rapide du site lui-même pour quelqu'un de non spécialiste (ajout de couleurs, convivialité dans l'affichage). Le modèle devra être diffusé avec un "indice de confiance". Cet indice de confiance dépendra de nombreux paramètres, notamment de la fiabilité des renseignements reçus sur le site et du type de données utilisées.

Proposition de méthodologies de reconstruction

Les choix doivent porter sur les différentes étapes possibles de la modélisation, à savoir la modélisation du bâti ainsi que celle de l'environnement. Pour ces différentes étapes, il est nécessaire de déterminer les types de logiciels à utiliser ainsi que le format d'export des réalisations. Lors de la phase de recherche des étapes de chaque méthodologie, un choix a du être fait quant au type de logiciels à utiliser.

Notre choix s'est tourné vers des logiciels commerciaux. Les logiciels utilisés ont été choisis pour leurs simplicités d'emplois et leurs capacités à pouvoir intégrer les informations issues de données diverses. Un choix a du être mené quant au format d'export des futurs modèles créés à l'aide des deux méthodologies. En effet, plusieurs formats d'export pour la visualisation des modèles sont utilisables dans les logiciels de modélisation : .wrl (format VRML), .dxf (format Autocad), .3ds (format 3D Studio Max), etc. Le choix s'est rapidement tourné vers l'emploi du format VRML. En effet, il est destiné à devenir le format d'export 3D principal par les organismes de la Défense. De plus, le VRML, du fait de sa facilité d'emploi et de manipulation semble être adapté. En outre, de nombreux visualisateurs gratuits sont disponibles sur Internet, contrairement à d'autres formats propriétaires qui nécessitent l'achat de logiciels pour la visualisation d'après Topol [2001]. Un autre avantage existe car, bien que le VRML soit un langage de programmation, une connaissance même sommaire du code permet de créer ou modifier les modèles.

La première et majeure étape de l'étude a été de déterminer des méthodologies de reconstruction. Afin d'atteindre les objectifs fixés par l'étude, deux méthodologies de reconstruction ont été proposées : une méthodologie en mode

monoscopique et une méthodologie en mode stéréoscopique (utilisation d'un couple stéréoscopique). La méthodologie en mode monoscopique permet de modéliser des bâtiments en 3D en utilisant la mesure des ombres sur les images satellites ou aériennes. La modélisation de l'environnement du lieu considéré est également possible. La méthodologie en mode stéréoscopique utilise des lunettes 3D permettant de visualiser la scène en relief pour modéliser à la fois l'environnement et le bâti d'un site. Les modèles 3D résultants sont visualisables au format VRML.

■ Analyse des résultats

De manière à tester les méthodologies proposées, une modélisation a été réalisée sur le site du réacteur de 50MW de Yong Byon (Corée du Nord). Les résultats obtenus sur ce site ont été présentés à la direction du renseignement militaire. Après discussions concernant la modélisation et les résultats obtenus, il apparaît que deux éléments des méthodologies doivent être améliorés. Tout d'abord, la détermination de la hauteur des bâtiments en mode monoscopique est jugée trop longue pour pouvoir permettre à la méthodologie de s'intégrer pleinement dans les cycles opérationnels. En effet, des calculs manuels utilisant la mesure des ombres doit être réalisé pour déterminer la hauteur des bâtiments. Les traitements et

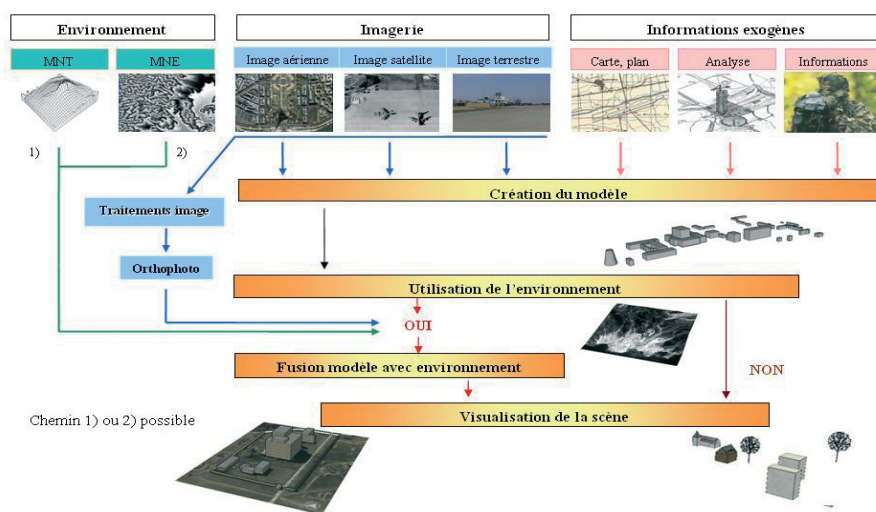


Figure 3 : Méthodologie monoscopique générale.

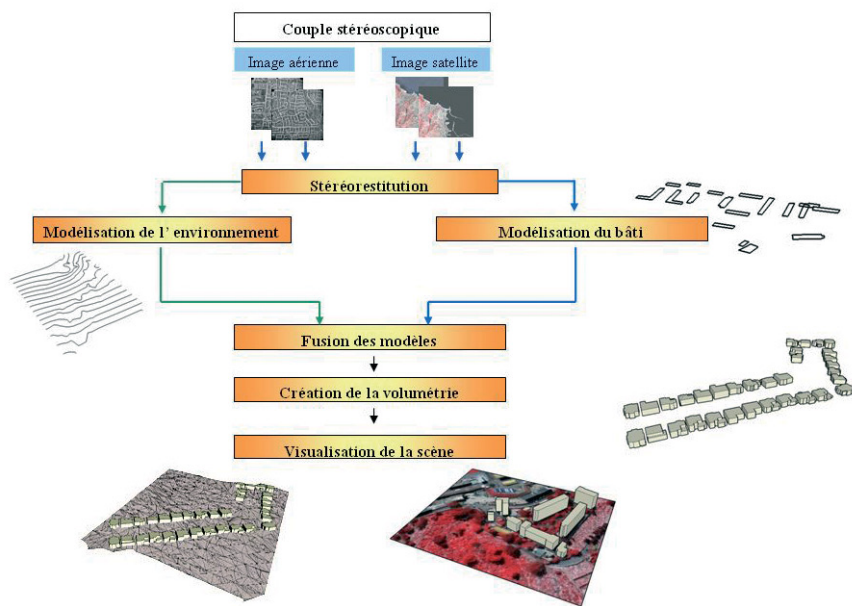


Figure 4 : Méthodologie stéréoscopique générale.

théories concernant cette méthode sont présents dans l'ouvrage de Poézévara [2001]. De plus, la fusion des deux fichiers VRML de l'environnement et du bâti en un seul fichier par manipulation de code est jugée trop complexe. En effet, il est nécessaire pour réaliser cette opération d'avoir des notions concernant le langage VRML, ce qui complique la tâche de l'utilisateur potentiel. Il semble donc nécessaire d'apporter des modifications aux méthodologies initiales proposées.

Les logiciels créés pour l'étude

De manière à améliorer les méthodologies, une chaîne de la valeur ajoutée a été créée. Quatre programmes ont été développés pour simplifier la démarche. Ces programmes ont été développés à l'aide du langage Visual Basic.

Le premier programme, nommé Hbat, permet d'automatiser partiellement le calcul de hauteur à l'aide de la mesure des ombres. Ce programme propose trois méthodes pour le calcul de la hauteur des bâtiments. Il a pour objectif de diminuer la durée de modélisation.

Le second programme, appelé FEnvBat (Fusion Environnement Bâti),

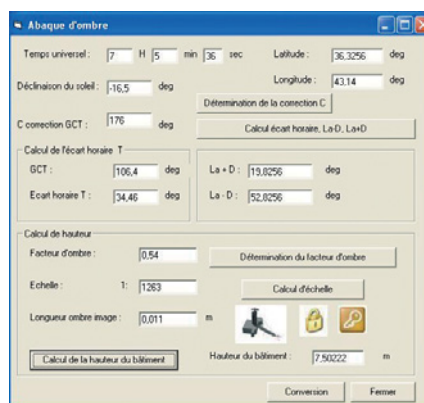


Figure 5 : Interface de calcul de hauteur des bâtiments dans Hbat.

permet d'automatiser en partie la fusion des deux fichiers VRML (fichier environnement et fichier bâti) sans avoir à écrire manuellement une seule ligne de code. Ce logiciel a pour objectif de simplifier la fusion des fichiers VRML et de permettre sa réalisation par le plus grand nombre d'utilisateurs possibles.

Le troisième, F2MVRML (Fusion de Monde VRML), se rapproche du programme FEnvBat dans le sens où il permet la fusion de données VRML. Toutefois, F2MVRML possède des fonctionnalités supplémentaires et notamment celle de pouvoir reconnaître à l'ouverture d'un fichier VRML

les fichiers VRML imbriqués. Il permet également d'ajouter des modèles VRML (fusion) dans une scène mais permet également d'enlever des modèles VRML d'une scène (ce qui peut être utile lors de la destruction d'un bâtiment par exemple). Le quatrième programme développé, RecT (Recherche de textures) permet de rechercher des textures dans un fichier VRML. Ce programme permet le déplacement de fichiers VRML sous un autre chemin informatique ou sur un autre ordinateur.

Ainsi, dans un but de simplification des premières propositions de méthodologies présentées en début de projet à la Direction du Renseignement Militaire, quatre programmes ont été développés : Hbat (automatisation partielle du calcul de hauteur des bâtiments à l'aide de la mesure des ombres), FEnvBat (automatisation partielle de la fusion de deux fichiers VRML), F2MVRML (suppression de modèles VRML d'une scène), RecT (recherche de textures dans un fichier VRML).

Analyse des résultats

Afin de vérifier la pertinence de deux méthodologies, des tests ont été réalisés suivant les différents cycles opérationnels. Les modélisations d'un site industriel d'Auxonne (France), des réacteurs nucléaires de 5 et 50 MW de Yong Byon (Corée du Nord), de la tour de lancement de No Dong (Corée du Nord), d'un quartier de Richmond Hill (Canada) et d'Alger (Algérie) ont été réalisées.

Les tests réalisés ont permis de dégager des points forts pour chacune des méthodologies. La méthodologie en mode monoscopique permet l'emploi de données multi-sources et multi-capteurs, semble s'intégrer dans les cycles opérationnels et être utilisable par des non spécialistes. La méthodologie en mode stéréoscopique permet à l'aide d'un seul couple stéréoscopique de modéliser le bâti ainsi que l'environnement. De plus, les modèles créés sont exportés au format VRML ce qui les rend "facilement" exploitables.

Le principal point faible de ces méthodologies est qu'il faut disposer de don-

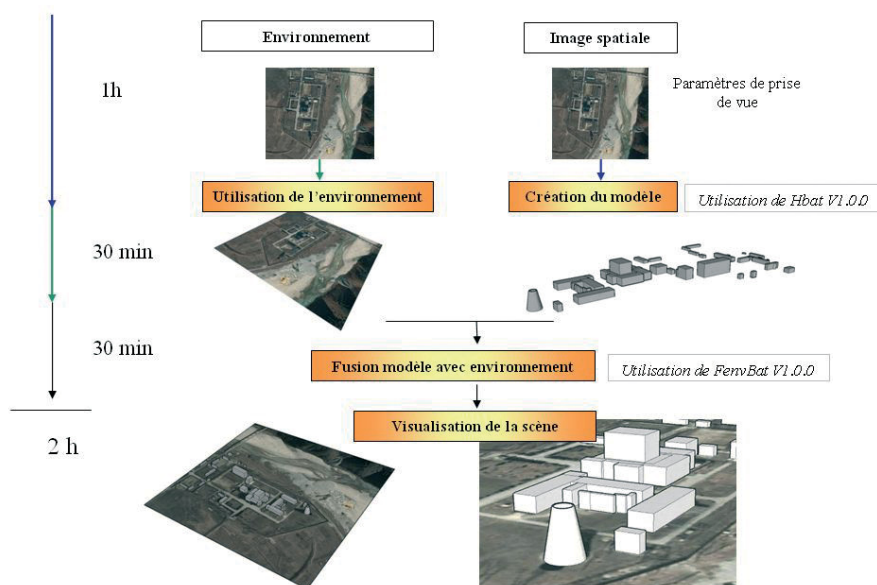


Figure 6 : Modélisation en mode cycle à froid de la centrale nucléaire de 5MW de Yong Byon.

nées pertinentes pour pouvoir effectuer une modélisation. En mode monoscopique, on doit disposer des paramètres de prise de vue ou d'un élément de référence connu en hauteur dans la scène. En mode stéréoscopique, on doit disposer du couple de la zone à étudier ce qui n'est pas toujours facilement réalisable dans un contexte Défense. De plus, la méthodologie en mode stéréoscopique ne semble s'appliquer qu'au cycle veille ou à la planification à froid et être utilisable par des opérateurs qualifiés.

La chaîne de reconstruction

L'objectif principal du projet de fin d'étude est de proposer une chaîne de

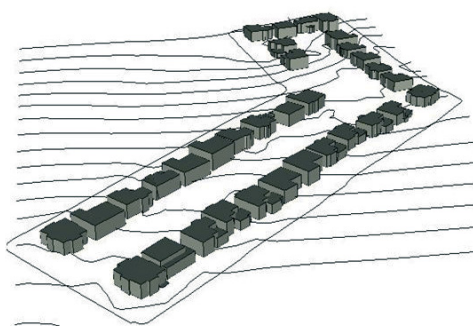


Figure 7 : Modélisation d'un quartier de Richmond Hill, Canada.

reconstruction 3D de sites tenant compte des conditions particulières de réalisation et d'utilisation du domaine d'emploi. Jusqu'ici, nous nous sommes attachés à proposer des méthodologies "ad hoc" permettant de s'inscrire dans les cycles opérationnels. Au delà de cette première étape, il a été important de tenter de systématiser ces expérimentations et de proposer une chaîne opérationnelle complète de reconstruction. Au final, une chaîne de reconstruction s'articulant autour de deux méthodologies (monoscopie et stéréoscopie) a été proposée. Cette chaîne comprend l'aspect matériel et technique (Hardware, Software, périphériques 3D) et l'aspect humain. Une évaluation financière des moyens matériels à mettre en oeuvre a également été réalisée pour cette chaîne de reconstruction.

Perspectives

Apports des résultats obtenus en regard des problématiques de Défense

Les expérimentations réalisées en fonction des différents cycles opérationnels (cycle à chaud, cycle à froid, cycle veille) et des deux méthodologies (monoscopique et stéréoscopique), ont permis de mettre en évidence un certain nombre d'apports

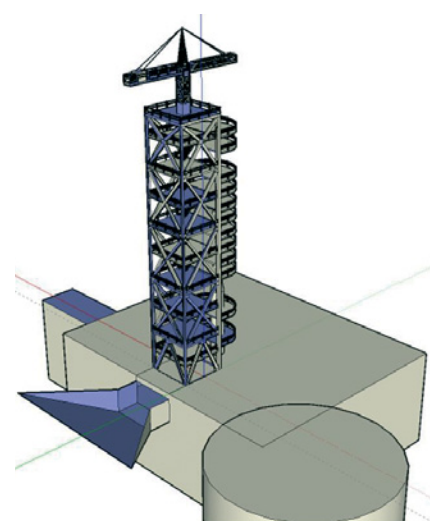


Figure 8 : Modélisation de la tour de lancement de No Dong (Corée du Nord).

concernant des applications de type Défense : contre prolifération, ciblage, préparation de mission, analyse de mission, évaluation de dommages, suivi de crises, simulation, etc.

Contre prolifération : les représentations 3D de sites dits "proliférant", comme la tour de lancement de No Dong ou les réacteurs (5MW et 50MW) de Yong Byon, ont pu être modélisées. Ces modélisations apportent des informations complémentaires essentielles à la compréhension de la spécificité, de la capacité et du fonctionnement des sites. Elles permettent, par conséquent, de réaliser des analyses techniques des sites par rétro-ingénierie.

Préparation de mission : une modélisation d'un site industriel a permis de réaliser une mission type en étudiant à l'avance les cheminements possibles des équipes vers leur objectif (désigné clairement sur le modèle par rapport aux autres bâtiments), et en exploitant les zones d'ombres créées par les bâtiments. Les modèles 3D permettent sans aucun doute d'avoir une meilleure idée de la zone cible qu'avec une carte ou une photographie.

Analyse de missions ou d'événements : la 3D apparaît comme un outil de communication efficace. La 3D permettra de désigner clairement où se

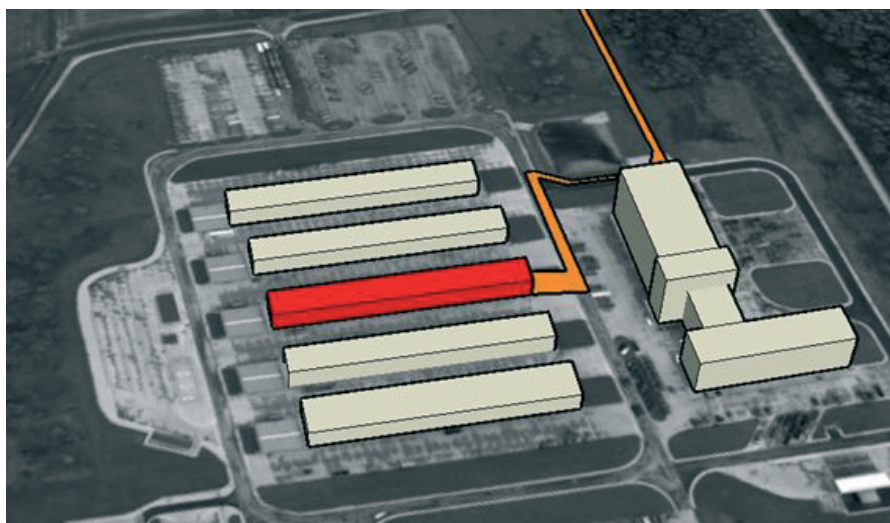


Figure 9 : Modélisation du site industriel d'Auxonne, le bâtiment cible est représenté en rouge.

■ ■ ■ sont posés les problèmes et permettra également de voir comment y ont répondu les hommes sur le terrain. Dans le cadre d'une nouvelle action sur la même zone, les risques rencontrés ou la non exactitude du modèle par rapport aux éléments rencontrés sur le terrain pourront être corrigés.

BDA (Battle Damage Assessment : Evaluation des dommages) : Cet aspect paraît, exploitable par les deux méthodologies présentées grâce à la création du logiciel F2MVRML qui va permettre de supprimer des bâtiments d'une zone.

Résolution de crise : on peut citer l'exemple d'un tir d'artillerie (présenté comme accidentel) d'une position occupée par les troupes d'un pays sur une position occupée par des troupes de maintien de la paix. L'apport de la représentation du site en 3D et la capacité de pouvoir le manipuler facilement en VRML permet d'établir si le tir est susceptible d'être accidentel ou délibéré et donc hostile (cible visible et accessible en tir direct depuis la position de départ, ou clairement identifiable depuis les positions incriminées).

Simulation : l'apport de la reconstitution 3D est également très important dans ce domaine. En effet, les modèles créés sur les sites sensibles pourraient être utilisés en "instruction" afin de présenter aux décideurs ou diplomates

les risques potentiels concernant des pays déterminés. De plus, la modélisation de sites, où se sont déroulés de réelles opérations militaires, peut servir d'exemple lors de cours de tactique ou stratégie militaire, en expliquant notamment le déroulement des opérations et des manœuvres réalisées sur le terrain.

Evolutions possibles, améliorations, optimisations des techniques proposées

■ Evolutions des méthodologies

Dans les deux méthodologies, des programmes ont été développés en interne pour former une chaîne de la valeur ajoutée. Cette chaîne comporte les logiciels suivants : Hbat, FEnvBat, F2MVRML, RecT. La première évolution pourrait consister à améliorer les modules de chacun des programmes (pour Hbat : intégration de tables des déclinaisons sous un format Excel, permettre la fusion simultanée d'un nombre illimité de fichiers pour FEnvBat et F2MVRML, permettre la recherche simultanée des caractères majuscule et minuscule des extensions de fichiers, permettre la mesure directe des ombres à partir d'une ouverture du fichier image, etc). La seconde évolution de la chaîne consisterait à fusionner ces différents logi-

ciels pour n'en former plus qu'un. Une troisième évolution serait, à plus long terme, de réaliser une analyse fonctionnelle des besoins de manière à pouvoir intégrer les fonctions de la chaîne de la valeur ajoutée dans des modules intégrés aux programmes Défense.

Une perspective d'emploi des deux méthodologies serait de pouvoir les exploiter de manière simultanée dans un même modèle. On pourrait par exemple vouloir déterminer des bâtiments à l'aide de la stéréoscopie et d'autres bâtiments à l'aide de la monoscopie (selon les impératifs de temps et de précision de modélisation notamment). De manière à valider cette possibilité d'emploi, des tests doivent être réalisés.

Pistes de recherche

Le projet présenté ici pourrait être complété. Les études possibles sont présentées par domaine d'application. Dans le cadre d'emploi de la contre prolifération, la modélisation de sites d'intérêt militaire pourrait être intégrée dans une base de données de manière à pouvoir retrouver facilement et rapidement les modèles d'une zone déterminée. Ainsi, il serait nécessaire de définir les liens entre cette base de données et les modèles.

Une évolution semble possible dans le domaine du ciblage. Une étude pourrait être menée de manière à étudier la possibilité de transformation des formats "classiques" des modèles 3D aux formats utilisés par le ciblage.

Dans le cadre de la simulation, les modèles créés à l'aide des deux méthodologies semblent pouvoir être utilisable en combat virtuel. En effet, un jeu vidéo, utilisé par l'Ecole d'Application de l'Infanterie (EAI) de Montpellier, peut accepter les formats .map provenant du logiciel graphique commercial. Or, les modèles exportés en VRML peuvent être transformés en .map. Une étude future pourrait donc consister à évaluer l'utilisation des modèles 3D pour le combat virtuel.

Conclusion

L'objectif de la présente étude a été de proposer une chaîne opérationnelle de reconstruction tridimensionnelle de sites dans un contexte Défense, en utilisant les données disponibles et selon les délais de réalisation compatibles avec les impératifs opérationnels. Les modèles 3D réalisés avec cette chaîne devaient pouvoir être utilisés rapidement par tout type de personnes qu'elles soient spécialistes ou non de la manipulation de données géographiques et informatiques.

La méthodologie en mode monoscopique permet l'emploi de données multi-sources et multi-capteurs, semble s'intégrer dans les cycles opérationnels et être utilisable par des non spécialistes. La méthodologie en mode stéréoscopique permet à l'aide d'un seul couple stéréoscopique de modéliser le bâti ainsi que l'environnement. De plus, les modèles créés sont exportés au format VRML ce qui les rend "facilement" utilisables.

Le principal point faible de ces méthodologies est qu'il faut disposer de données pertinentes pour pouvoir effectuer une modélisation. De plus, la méthodologie en mode stéréoscopique ne semble s'appliquer qu'au cycle veille ou à la planification à froid et être utilisable par des opérateurs qualifiés.

La finalité du Projet de fin d'Etudes était de proposer une chaîne complète de reconstruction, des recherches ont donc été menées dans ce sens. Au final, une chaîne de reconstruction s'articulant autour des méthodologies proposées (monoscopie et stéréoscopie) a été proposée. Cette chaîne comprend l'aspect matériel et technique (Hardware, Software et périphériques) et l'aspect humain (en effet, outre l'aspect purement matériel, l'homme joue un rôle prédominant dans la qualité des modèles créés).

En définitive, la chaîne de reconstruction proposée semble être utilisable dans un contexte Défense. Toutefois, la 3D n'est pas une solution miracle. La 3D a un coût en terme de formation et d'organisation. Il est important de voir la 3D

comme un complément utile pour des applications spécifiques.

Outre ces considérations d'emplois, l'étude menée au sein de la Direction du Renseignement Militaire permet de voir que le potentiel de la 3D est non négligeable pour des applications Défense. En effet, le projet a permis de montrer que l'emploi de la 3D peut être rendue possible pour de nombreux domaines comme la contre prolifération, la modélisation de sites d'intérêts militaires, le ciblage, la préparation de mission, l'analyse de missions ou d'évènements, l'évaluation de dommages et la simulation. Les études sur ce domaine n'en sont donc qu'à leurs débuts et promettent de belles perspectives. ●

Références bibliographiques

- Bonn, F. & Rochon, G. [1992]**, *Précis de Télédétection, Principes et méthodes*, volume 1, Québec
- Borovsky, P., Ftacnik, M. et Samuelcik, M. [2004]**, *Low Cost High Quality 3D Virtual City Models*, Ed Manfred Schrenk, 9th International Symposium on Planning & IT, Vienne, Autriche, février 2004, p 343-350
- DGA & Thales [2005]**, *Le maquettage 3D et la réalité virtuelle au service des interventions*, Fort d'Issy
- Früh, C. & Zakhor, A. [2003]**, *Constructing 3D City Models by Merging Aerial and Ground Views*, In IEEE CG & A 6/23, p52-57
- Grussenmeyer, P. [2005]**, *Cours de photogrammétrie*, INSA Strasbourg, Filière Topographie
- Koehl, M. [2003]**, *Cours de Visual Basic*, INSA Strasbourg, Filière Topographie
- Koehl, M. [2005]**, *Cours de Modèle Numérique de Terrain*, INSA Strasbourg, Filière Topographie
- Landes, T. [2004]**, *Cours de Télédétection G2*, INSA Strasbourg, Filière Topographie
- La rédaction [2004]**, *La géographie opérationnelle* ; Objectif Défense, n° 129, p 3-20
- La rédaction [2005]**, *La 3D au service du SIG* ; Géomatique Expert, n° 41/42, p38-42

Maxwell, J. [2001], *VRML : votre site en 3D*. Compétence Micro, Editions KnowWare, ISBN 2-912954-48-7

Ravelet, M. [2005], *L'Armée s'appuie sur l'imagerie pour créer une ville de combat* ; Géomètre, n° 2011, Publi-Topex SA, p 44-45/62

Rousselin, T. [2002], *Le programme DNG3D : des capacités géographiques adaptées aux besoins des systèmes de Défense* ; L'ARMEMENT, n° 78, p154-159

Sweetman, B. [1997], *Spy satellites : the next leap forward : Exploiting commercial satellite technology*. Jane's international defense review, n°1, p. 26-32

Topol, A [2001], *VRML : étude, mise en œuvre et applications*

Wilmann, M. [2005], *Hélios 2A l'envol de la haute résolution*. DIAGONAL, Editions DGA/COMM, p.2-3/8

Contact

Hervé DAUDIGNY
hedaudigny@hotmail.com

ABSTRACT

The purpose of the project was carried out at the DRM (French Military Information) and is to meet the needs for the Armies in term of 3D rebuilding. The aim of the study is to propose an operational chain of three-dimensional rebuilding of sites starting from space or airborne data, by using the data available and according to the requirements of the operational cycles. In order to achieve these goals, two methodologies of rebuilding were proposed: a methodology in monoscopic mode and a methodology in stereoscopic mode. To test these last, models were carried out, a chain of rebuilding articulating itself around two methodologies could be proposed.

Photogrammétrie et muséologie

Les Sèvres du musée de Rouen

■ Sébastien VAREA

Nous présentons dans cet article les solutions techniques que la photogrammétrie et, plus généralement la modélisation 3D, peuvent apporter aux différentes missions qui incombent aux conservateurs de musée incarnés ici par Madame Christine Germain-Donnat, conservatrice du Musée de la Céramique de Rouen.

L'ensemble de ces missions sont regroupées dans le terme muséologie qui définit le devoir de conservation et se rapporte aux sciences et techniques qui concourent à la conservation du patrimoine, au classement et à la représentation des œuvres.

Ainsi nous nous sommes attachés à la modélisation des œuvres d'art et à la production d'outils d'études et d'informations les concernant.

Ce projet de fin d'études est original en ce sens qu'il propose une alternative très abordable aux méthodes d'acquisition basées sur l'utilisation de scanners 3D, onéreux, et qui se sont pas nécessairement adaptées aux besoins.

Contexte de l'étude

Collections XIX^e et XX^e siècle :

Les Sèvres du musée de Rouen

Fournisseur attitré des Palais de la Nation, la Manufacture de Sèvres, relativement protégée par son statut officiel, dut faire face au XIX^e siècle, à un vent de critiques violentes remettant en cause son fonctionnement voire même sa raison d'être. Pourvoyeuse de cadeaux diplomatiques, de services de table et d'ornements divers pour les différentes administrations, elle revendiquait pourtant un rôle de conseil et d'assistance technique auprès des fabricants français. Une profonde réforme mise en œuvre en 1892, réaffirma son rôle d'enseignement et sa mission éducatrice.

La politique d'envois de pièces anciennes ou contemporaines que Sèvres mena dès lors de manière systématique à destination des musées de province lui permit de montrer ses créations les plus récentes auprès d'un large public et de légitimer son existence.

Le musée de Rouen fut particulièrement bien doté grâce à différents envois, dont les plus importants datent de 1884, 1901 et 1934. Une centaine de pièces plus un ensemble de petits

bustes en biscuit attribué dès 1882 et 1883, forment aujourd'hui la collection des Sèvres du musée de la Céramique. Trois beaux ensembles illustrent, le dernier quart du XIX^e siècle, la création autour de 1900 et la période entre-deux-guerres. Formes nouvelles empruntées à la nature, décors flammés, cristallisations... les Sèvres du musée de Rouen illustrent magnifiquement le renouveau céramique insufflé à la Manufacture par des directeurs tels que Albert Carrier-Belleuse ou Alexandre Sandier. Le vase des Saisons, parfait hommage à l'esprit du XVIII^e siècle ou le vase Rulhmann, somptueux manifeste esthétique des années 30, témoignent assez de la créativité et de l'excentricité de Sèvres au tournant des deux siècles. Quant à l'œuvre d'Arthur Massoulé, intitulée Les Raisins, elle conjugue de manière spectaculaire sculpture et céramique.

Problématique

Conservées jusqu'alors en réserve, ces œuvres en porcelaine ou en grès n'ont jamais été montrées au public ni documentées.

Elles sont aujourd'hui mises à l'honneur dans deux nouvelles salles du musée de la Céramique.

Installé dans un hôtel particulier du XVII^e siècle, monument historique, le musée n'est que partiellement aménagé pour accueillir les personnes à mobilité réduite. Ces nouveaux espaces de présentation situés au second étage du musée sont malheureusement difficiles d'accès pour les personnes handicapées.

C'est pourquoi nous nous sommes appliqués à leur mise en valeur : une visite virtuelle des salles assortie d'une base de données concernant les œuvres les plus remarquables de la collection constitue à nos yeux, la meilleure réponse à ce problème. Une borne interactive sera installée au rez-de-chaussée du musée et aisément consultable par tous.

De plus la numérisation de ces œuvres nous a permis d'établir une documentation complète de chaque œuvre et a



Outils d'aide à la muséologie.

assuré la mise en place de nombreux outils d'étude tels que : la création de profils, l'aide à la gestion des espaces de stockage, la production de déroulés (mise à plat des décors) ou encore l'assistance à la projection muséographique (scénographie et mise en espace virtuelles).

Photogrammétrie et modélisation

■ L'aspect qui nous intéresse dans cette section est la modélisation d'objets à partir d'images

Nous proposons une approche basée sur la photogrammétrie rapprochée multi-images associée à des techniques originales de repérage et d'orientation de sorte à reconstruire des objets 3D texturés proches de modèles réels.

■ Acquisition des données

Mode opératoire

Si aucune connaissance sur l'objet à modéliser n'est disponible, alors la production d'un modèle consiste à construire complètement ce modèle à partir des images de celui-ci. Ainsi passer d'images bidimensionnelles à un modèle tridimensionnel nécessite au moins deux images, la projection 3D-2D entraînant une perte d'informations.

L'objectif devient alors la réalisation de l'extraction de primitives depuis les images : les primitives sont ici les projections, dans les images, des éléments constituant le modèle à construire [FAU 93]. Ces primitives peuvent être des points, des segments ou des entités géométriques plus complexes (courbes, etc.).

Pour réaliser cette extraction de primitives, nous utilisons une technique proche de l'utilisation de cibles placées sur l'objet à modéliser, à la différence qu'ici un ensemble de points lumineux est projeté sur l'objet (nous respectons le principe de non contact avec les œuvres dans un souci de conservation). Il ne s'agit pas ici d'un processus basé sur l'utilisation de lumière structurée¹. Nous proposons l'acquisition de données sur base passive.

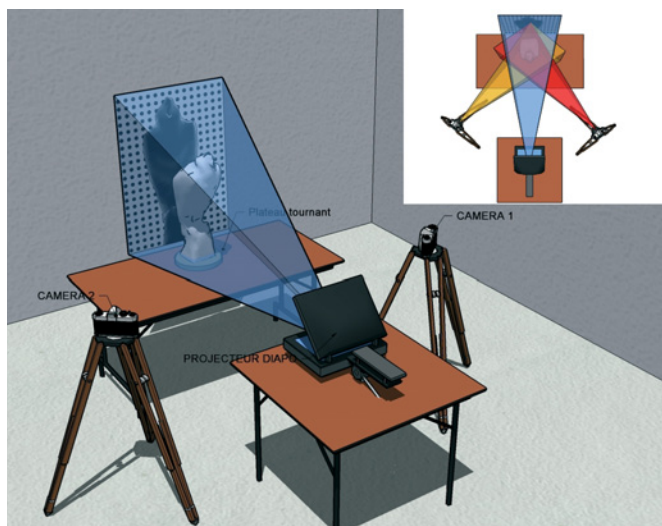


Schéma du dispositif de prise de vue.



Couples de photos convergentes issues de l'acquisition.

Notre méthode se base donc sur la stéréovision. Nous captions pour chaque position de l'objet un couple de photos convergentes.

Le processus de prise de vue comprend :

- Un plateau tournant composé d'un ensemble de points ronds noirs déterminés en coordonnées par rapport au centre de ce plateau ;
- Un projecteur de diapositives ;
- Deux diapositives créant un réseau de points lumineux ou sombres ;
- Une caméra munie d'un trépied (deux positions).

Cette technique offre une flexibilité à toute épreuve (simplicité de mise en œuvre et adaptabilité aisée) et un coût réduit.

Appariement des points homologues

Il réside un problème essentiel à résoudre : la mise en correspondance entre les deux images des points homologues. Cette méthode doit répondre à deux contraintes duales suivantes. Les deux caméras doivent être suffisamment éloignées l'une de l'autre. En effet, plus l'angle d'intersection augmente et plus la précision de reconstruction est importante. En revanche, dans ce cas, la similarité entre les points caractéristiques diminue et complique donc la phase de mise en correspondance. La configuration des deux caméras est donc un compromis entre le nombre de points caractéristiques à appairer et la précision finale de reconstruction.

Notre mot d'ordre étant de mettre au point une alternative peu coûteuse et de rendre la création de tels modèles rapide et efficace mais aussi sérieuse, nous proposons l'utilisation du logiciel Photomodeler pour simplifier cette mise en correspondance.

La projection de points permet l'extraction de points caractéristiques. Cette extraction est d'autant plus simplifiée que Photomodeler réalise la détection automatique de cibles (Automatic Target Marking).

(1) Ce système utilise la projection de mires codées sur un objet, ainsi en analysant le signal capté et par comparaison avec le signal original, il devient possible d'estimer la géométrie du modèle.[VAL 02]



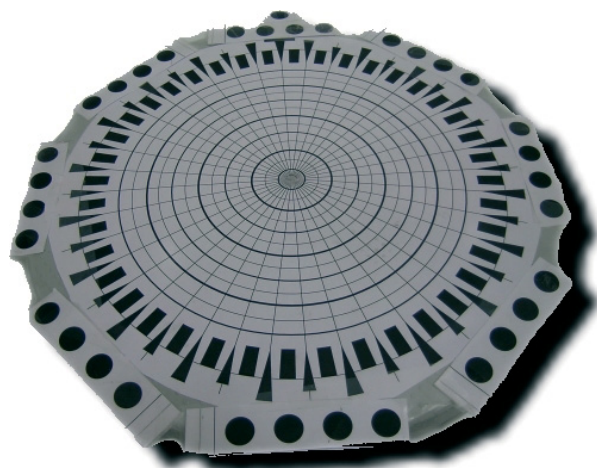
Point photomodeler centré sur la tache et ellipse pour le marquage sub pixel.

Cette option permet la création d'un point Photomodeler au centre d'une tache lumineuse ou sombre (dark/light targets). De plus il nous a été possible de réaliser un marquage Sub-pixel. Cet algorithme d'interpolation peut déterminer le centre d'une ellipse avec une précision en dessous du dixième de pixel. De fait, la mesure spatiale 3D obtenue par photogrammétrie est directement liée à cette interpolation sub-pixel. Ainsi la précision globale des mesures 3D peut être multipliée par deux si la détermination du centre des ellipses est réalisée avec une précision de 1/20 de pixel au lieu de 1/10 de pixel.

A la fin de cette étape chaque photo présente un nuage de points qui reste à appairer. De nouveau, l'utilisation d'une routine Photomodeler optimise cette étape. Cette optimisation concerne le temps d'appairage et le sécurise. En effet, un appairage manuel est long et soumis à des erreurs. Mais afin que Photomodeler soit capable de réaliser cette mise en correspondance automatique des points homologues, il faut que le couple de photos soit orienté (orientation relative et absolue). Nous proposons pour ce faire l'utilisation d'un plateau diviseur, de notre création, tournant, permettant le repérage dans l'espace et donc l'orientation des photos. Ce plateau diviseur nous est aussi utile lors de la capture de la carte des textures (voir plus loin dans l'article)

La couronne de points présente sur le plateau, nous permet de réaliser l'orientation des photos sans connaître de soucis quand à la détermination de points particuliers ; de plus, grâce à la mise au point d'un système de coordonnées, il devient possible de réaliser un contrôle quant à la qualité de cette orientation.

La fin de l'acquisition des données correspond à la production d'un nuage de points 3D décrivant l'objet à modéliser. La



Plateau diviseur tournant utilisable pour l'orientation des photos.



Exemple d'œuvres ayant subi une acquisition par projection de points : Les Raisins (Massoule), Le Condor (Bachelet), et nuage de points produit.



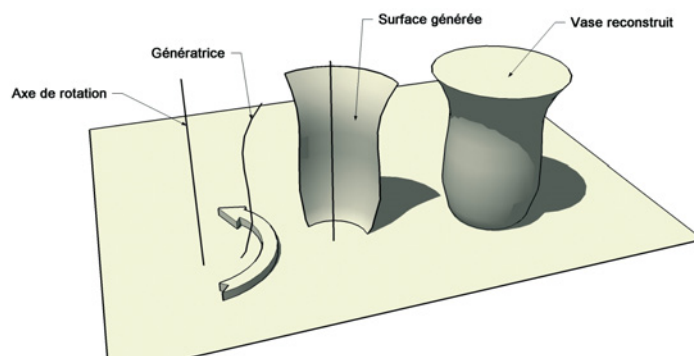
Trois vases modélisés : Vase Gensoli, Vase Ruhlman, Vase du Creusot.

méthode ici exposée a été éprouvée pour des objets tels que Le Condor de Bachelet, Les Raisins de Massoule qui présentent des formes sculpturales interdisant l'utilisation de surfaces mathématiques et rendant impossible une généralisation de leur forme.

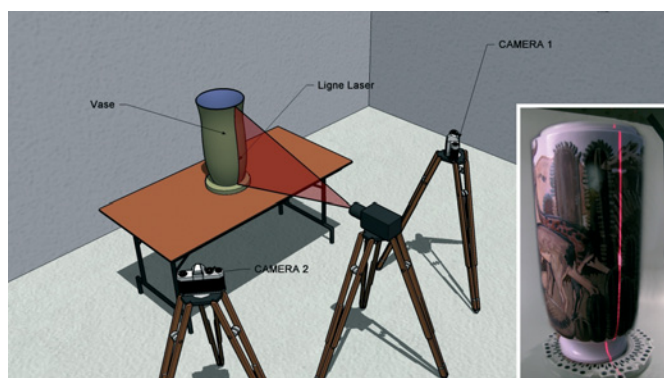
Mais d'autres œuvres d'arts faisant l'objet de notre numérisation ont des formes particulières, notamment celles qui sont issues d'un procédé de fabrication sous rotation (Vases réalisés par tournage).

Méthode d'acquisition propre aux vases

Nous établissons alors pour les vases un processus de reconstruction qui tient compte de leur caractéristique morphologique. Cette technique se base sur le dégagement d'un



Technique proposée pour la reconstruction des vases.



Mode opératoire pour l'acquisition des vases.

profil du vase (génératrice) et de sa généralisation autour de l'axe de rotation du vase.

Ainsi, et toujours dans un souci de conservation des œuvres, il nous faut extraire un profil caractéristique du vase. Ne pouvant agir directement sur le vase, nous proposons la projection d'une ligne laser (niveau laser calé et bullé) verticale matérialisant le profil voulu.

Puis, moyennant l'orientation d'un couple de photos de cette ligne, nous la restituons sous Photomodeler puis la généralisons autour de l'axe de rotation vertical du plateau (où nous avons bien entendu centré le vase auparavant).

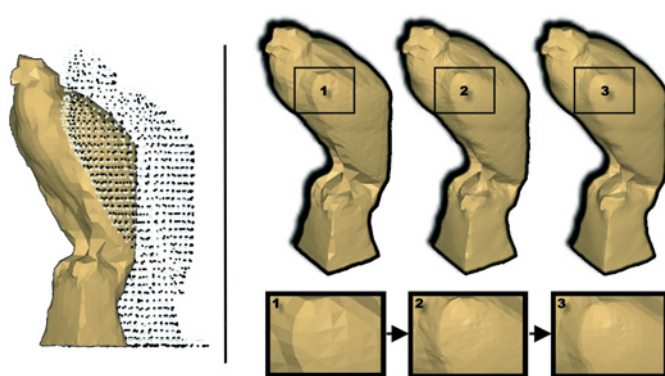
Fin de la modélisation : création d'un modèle surfacique.

Il s'agit ici de reconstruire un modèle à partir de l'ensemble des données acquises. Cette nouvelle étape précède le placage de texture jusqu'à l'obtention d'un modèle photo-réaliste. La reconstruction de la surface est réalisée par maillage fidèle aux points créés (interpolation). Cette méthode est très couramment utilisée. Elle consiste en la conception d'un maillage triangulé des primitives et en l'obtention de facettes triangulaires. Ce réseau peut être créé manuellement, cependant ce travail peut rapidement devenir fastidieux ! Il existe des logiciels orientés reverse engineering 3D² qui permettent la reconstruction de surfaces à partir de nuages de points [AME 98] [MOR 00].

Le logiciel que nous utilisons pour cette étape est 3DReshaper de la société TECHNODIGIT.

En utilisant notre technique, nous n'avons pas besoin de prétraitement des données (nettoyage) puisque tous les points sont supposés appartenir à la surface (à la différence des nuages de points issus des scan3D qui eux fournissent des données accompagnées de "bruit"). La méthode pour traiter ce problème est basée sur un algorithme en deux phases : une triangulation 3D de Delaunay (tétraèdres) est tout d'abord construite à partir du nuage de points, ensuite l'algorithme extrait une surface polygonale en sélectionnant les triangles adéquats de la triangulation 3D à partir de considérations géométriques et topologiques [BOI 02].

(2) Le reverse engineering est en fait la conception inverse, on part d'un produit existant, que l'on va numériser, afin de créer un fichier informatique.



Modèle surfacique, lissage et densification du maillage.

L'intérêt de ces algorithmes réside dans le fait que les données entrées ne sont pas détériorées par un ajustement. De plus, l'interpolation permet de densifier le maillage ou encore de l'alléger. Ainsi, une étape de lissage sans rétrécissement de la surface permet d'éliminer des erreurs produites par la procédure de triangulation, puis une étape d'optimisation est appliquée pour supprimer les sommets redondants.

L'appréhension de l'ensemble de ces considérations a été simplifiée par l'utilisation du logiciel 3DReshaper.

Les modèles issus de cette nouvelle étape sont les modèles finaux en ce qui concerne la structure géométrique. Cependant, ils présentent toujours une carence en informations photométriques. Les modèles reconstruits sont maintenant prêts à subir l'application de texture.

■ Rendu des textures

Madame Christine Germain-Donnat a porté tout au long de cette étude une attention particulière quant à la numérisation des œuvres, éprouvant les techniques sur des formes diverses et de plus en plus complexes ou encore insistant sur des détails de modélisation tels que les têtes, les pieds ou encore les mains personnages sculptés.

Mais plus grandes étaient ses exigences concernant le rendu de la texture des différentes œuvres d'arts. En effet le rendu de texture donne une nouvelle dimension au modèle surfacique, le rendant plus similaire au modèle réel, plus abordable à la perception humaine et à l'entendement. Ces modèles texturés peuvent être aisément utilisés à la place des objets réels pour des études aussi bien géométriques que descriptives.

De tels modèles 3D texturés photoréalistes fournissent un grand nombre d'informations additionnelles pour les sujets de recherche à la condition bien sûr que l'application de texture soit réalisée avec précision. Toutes les informations photométriques reconstruites permettent de réaliser des mesures sur des points caractéristiques difficilement identifiables sur un modèle surfacique nu.

Ainsi des effets tels que des décors flammés (issus d'un mode de cuisson particulier : utilisation de sel) ou encore des créations de décors comme le pâte sur pâte (décor en relief) demandent une attention importante quand à leur rendu.

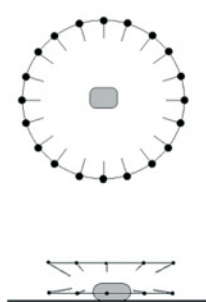
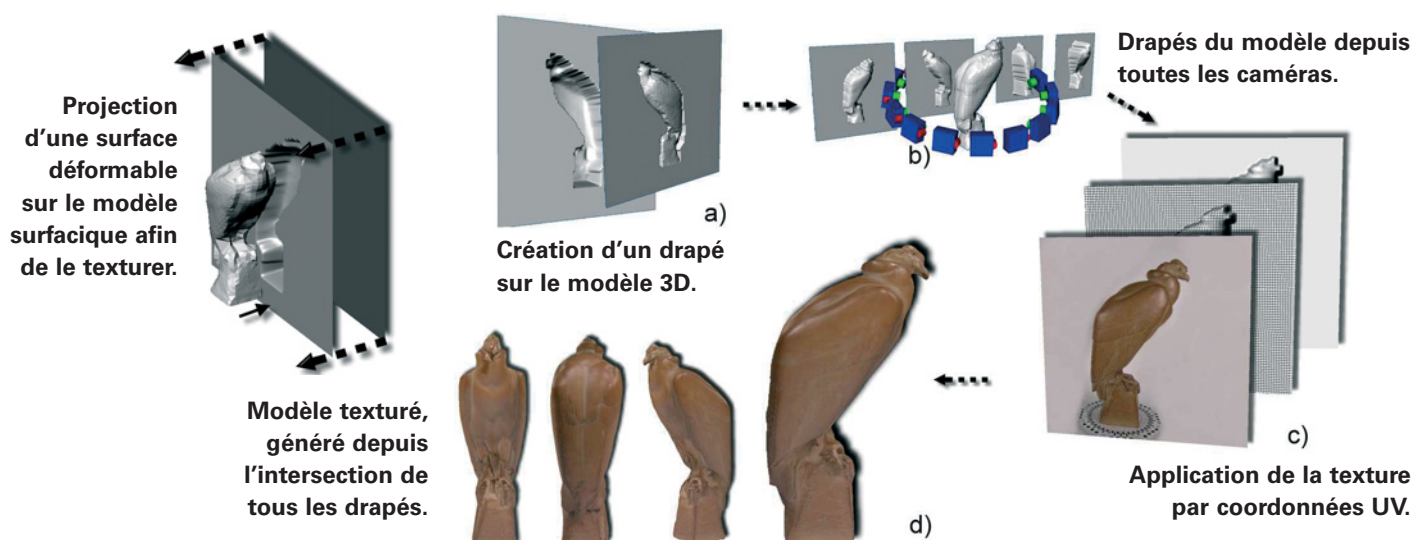


Schéma de prise de vue en anneaux [Eos systems, 03] et séquence d'acquisition pour le Condor de Bachelet.



Acquisition de la texture

Nous avons établi afin d'acquérir correctement la carte des textures, un processus de prise de vue systématique de l'intégralité des modèles [HAR 00].

Les modèles 3D dépendent aussi de la nature des photos. Il est ainsi essentiel de réaliser une couverture complète des objets à modéliser. Une solution efficace pour réaliser cette couverture est une méthode en anneaux. Nous réutilisons pour l'occasion notre plateau diviseur. Notre méthode d'acquisition consiste donc en un plateau tournant et une caméra fixe. L'éclairage et la caméra étant fixes, la luminosité, le contraste ainsi que la netteté des prises de vues ont été optimisés.

La pièce de musée faisant l'objet d'une acquisition, est placée sur un plateau tournant et une séquence de photos est réalisée à angles fixés : typiquement tous les 18 degrés, ce qui nous donne une séquence de 20 photos.

A partir d'une telle séquence et des données déjà en notre possession (modèle surfacique et position des caméras de prise de vue), nous réalisons l'application de la texture par projection de surfaces déformables issues des points de prise de vue (technique de projection de drapés orientés). Cette technique est basée sur le caméra matching, qui consiste en la création de caméras virtuelles positionnées dans les mêmes conditions d'orientation que les caméras réelles ayant servi à la prise de photos.

Nous nous attelons ainsi au mappage du modèle surfacique depuis tous les points de prise de vue. Chaque drapé est alors texturé par sa photo correspondante et le modèle 3D texturé photoréaliste final provient de l'intersection de toutes les surfaces déformables. Cette dernière étape de rendu de texture achève la partie modélisation de notre étude, nous allons maintenant pouvoir analyser l'ensemble des outils et des apports que nous proposons à Madame Christine Germain-Donnat pour l'aider dans sa mission de conservation.

Les apports de la photogrammétrie pour la muséologie

Définition des besoins, des attentes et des réalisations

L'ensemble de nos apports ont été motivés par des constatations et des considérations concernant les tâches et les missions des conservateurs. Le climat de confiance et d'émulation entretenu avec madame Germain-Donnat nous a permis d'établir avec justesse et réactivité l'ensemble des besoins. Ainsi nos contributions ont porté sur :

Une meilleure connaissance des collections

La collection XIX^e/XX^e siècle du musée de la Céramique est composée d'œuvres en porcelaine ou en grès envoyées par la manufacture de Sèvres entre la fin du XIX^e et les années

1930. Ces œuvres n'ont jamais été documentées. La photogrammétrie a permis d'établir pour chaque pièce, une fiche signalétique comportant les mensurations du vase (hauteur, largeur, profondeur, diamètre de col, diamètre de base, profil) ainsi que son volume de stockage et donc les dimensions d'une caisse de transport.

Par ailleurs, certains vases comme le vase Rulmann ou le vase Gensoli aux "danseuses cambodgiennes", comportent un décor tournant sur toute leur surface. La réalisation de "déroulés" a permis de confronter pour la première fois de manière aussi précise et détaillée, le dessin préparatoire conçu par l'artiste au décor effectivement réalisé à Sèvres.

- **Une préfiguration muséographique**

Quatre-vingt nouvelles pièces environ seront présentées cet automne au public.

Les réserves du musée de la Céramique sont situées au 6^e étage du bâtiment, sous les combles.

Les pièces ont été déplacées une fois pour la prise de photographies puis ont réintégré les réserves. Après avoir numérisé les œuvres les plus significatives de la collection ainsi que les deux futures salles d'exposition, la photogrammétrie a permis d'envisager sereinement différents types de présentation muséographiques sans avoir à déplacer à nouveau des pièces souvent lourdes (jusqu'à 100 kg) et fragiles ni faire appel à des manutentionnaires.

Les manipulations des objets ont été considérablement réduites. Il en résulte une plus grande sécurité pour les œuvres, une moindre pénibilité pour le conservateur, un gain de temps, et un gain d'argent (manutentionnaires).

Les difficultés consistant à imaginer l'œuvre dans l'espace, à envisager les circulations du public autour des vitrines ou d'œuvres sur socle ont pu être abordées grâce à ce procédé. L'éclairage, (problèmes de reflet, lumière du soleil), la couleur des salles ont également fait l'objet d'une réflexion anticipée grâce à cette technique.

- **Une visite virtuelle**

La réalisation d'une visite virtuelle des deux nouvelles salles, disponible sur DVD et consultable sur une borne au ré de chaussée du musée, rend la collection accessible au plus grand nombre. Le musée peut également s'exporter hors-murs, dans les centres de loisirs, les maisons de retraite par exemple, et offrir la vision la plus juste de ses collections.

- **La création d'une base de données en 3D**

La base de données en 3D permet à l'amateur comme au scientifique de considérer l'objet de la meilleure manière qui soit, du point de vue des dimensions, du volume, mais aussi de la texture. Le rendu des surfaces et reliefs a été soigné, de façon à donner de l'objet une vision parfaitement illusionniste. Outre le pedigree de l'œuvre, chaque fiche propose des détails et des informations complémentaires : dessin préparatoire, œuvres de comparaison, signature. Les images 3D de la base donnent à la céramique un aspect vivant voire ludique, propre à faciliter l'accès à la connaissance de l'amateur et enrichir la vision du scientifique.

■ **Détail sur la création des outils**

Des données physiques ...

Concernant la meilleure connaissance des collections, les œuvres d'art sont des objets de formes compliquées. De plus les informations concernant leurs caractéristiques physiques ne sont que très rarement répertoriées et sont le plus souvent incomplètes ; dans le cadre de la campagne muséologique de cette nouvelle collection, la photogrammétrie s'est présentée comme l'alternative heureuse à une intervention manuelle sur tous les vases.

Du reste, les données extraites peuvent être de plusieurs types : géométriques (points, lignes, surfaces) mais aussi visuelles (photométrie).

La richesse des données physiques des objets numérisés a rasséréiné Madame Germain-Donnat (Conservatrice du Musée de la Céramique de Rouen) dans son choix de faire confiance à la photogrammétrie.

Les exploitations des données et des modèles fournis par photogrammétrie sont nombreuses :

- Les mensurations des œuvres sont disponibles affichant une précision au-delà des besoins des conservateurs (besoins millimétrique pour une précision d'acquisition sub-millimétrique).
- La surface et le volume des objets sont déterminés. Cela permet notamment l'obtention des dimensions de la caisse (boîte) permettant l'emménagement de l'objet. De ce volume, il devient donc possible la gestion et le calcul de l'espace de stockage nécessaire dans les réserves.
- Les recherches concernant l'origine et l'histoire des vases sont facilitées. En effet, les vases sont inventoriés et classés par formes. La génération de coupes transversales et longitudinales permet la création de profils types. Le vase est alors caractérisé.
- Une documentation complète des œuvres est réalisée : photos, mesures ; dynamisant et consolidant la conservation préventive.

Un peu d'aide concernant les préfigurations scénographiques...

Pour apporter notre aide à la scénographie, nous nous basons sur l'utilisation de modèles virtuels en lieu et place des modèles réels.

Nous avons créé le mobilier nécessaire à notre préfiguration grâce au logiciel Photomodeler et nous réutilisons les modèles 3D créés. Le processus de modélisation s'appuie sur la même théorie que précédemment. Une préfiguration que nous présentons ici est la réalisation d'une scénographie concernant une vitrine. Nous permettons au conservateur de matérialiser plusieurs aménagements de la vitrine et d'imaginer plusieurs mises en couleurs. Pour placer les objets dans la vitrine, nous utilisons une application VRML. Une fois leur place déterminée, nous générons une image permettant d'archiver et de conserver le travail effectué. En utilisant cette technique, nous avons créé des espaces de circulation : réflexion sur le placement des œuvres imposantes.





Caractérisation du volume de stockage et de la caisse de transport, dégagement des profils caractéristiques, sections et coupes.

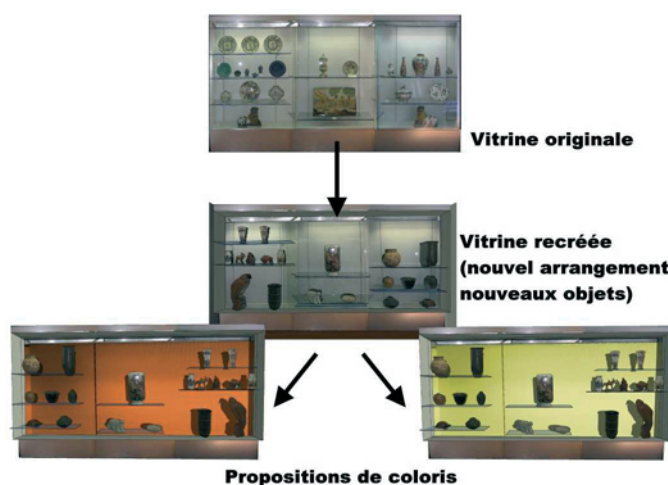
■ ■ ■ Nous avons permis au conservateur d'observer l'impact de la lumière du jour sur les vitrines ainsi que les éventuels reflets en fonction de l'heure de la journée (Figure 16 : Impacts des rayons du soleil sur les vitrines). Ces différents paradigmes sont réalisés grâce à la mise en coordonnées relatives des salles du musée par rapport au soleil et à la définition d'un jeu de lumières (système solaire).

Concernant la base de données 3d...

Nous proposons une base de données 3D selon un modèle de type réseau (données fixes). La base a été créée par programmation HTML, et est consultable comme un site Web. Différents liens hypertextes permettent à l'utilisateur de réaliser sa recherche. Nous proposons ainsi plusieurs modes de consultation : accès aux fiches des objets par classement thématique (Artiste, date, couleur ...), par visionnage de l'ensemble des miniatures ou par visite guidée (proposition de la découverte d'un artiste ou d'une oeuvre). Les fiches des objets sont toutes créées selon un gabarit type et sont éditables. De plus il est possible d'y ajouter de nouveaux objets. La valeur ajoutée de notre base réside en la présence d'une fenêtre VRML permettant la consultation du modèle 3D de l'oeuvre, l'affichage des profils créés et l'accès à des outils d'études tels que les déroulés des décors filant (mise à plat des décors).

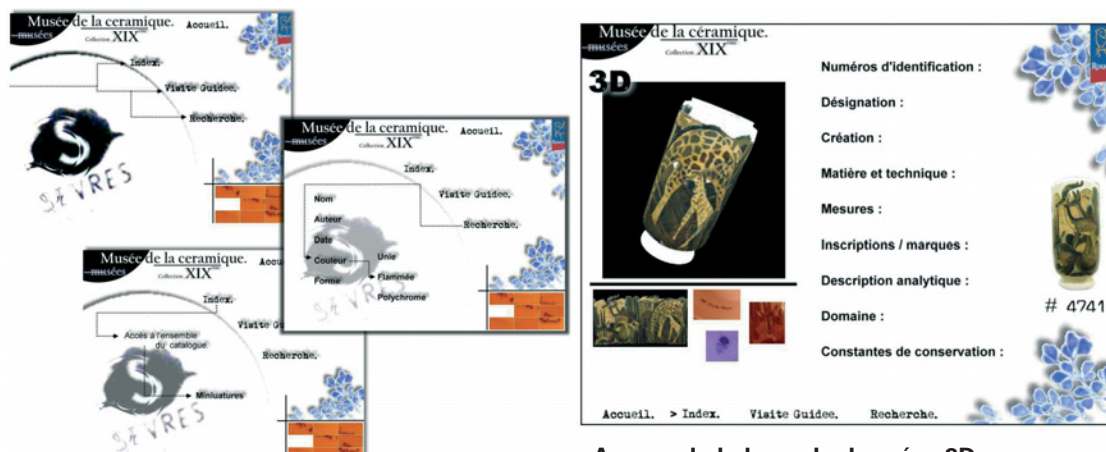
Production de déroulés

Les déroulés sont les surfaces mises à plat des vases. Afin de les créer, nous tirons parti de notre méthode d'acquisition et



Mise en espace d'une vitrine (position des objets et travail sur les couleurs).

de modélisation. Nous rappelons que la méthode d'acquisition consiste en la prise de vingt photos autour de l'objet et en la création de la surface du vase. Ainsi le vase, c'est à dire sa surface, se trouve décomposé en vingt sections. Nous calculons alors vingt orthophotos. Chaque orthophoto est composée d'une partie centrale propre à elle et de deux parties latérales réalisant la jonction avec la photo précédente et la photo suivante. Puis le déroulé est créé en accolant toutes les orthophotos extraites les unes aux autres à l'aide d'un logiciel de retouche d'images.



Aperçu de la base de données 3D.



Le vase Rulhman, son dessin préparatoire, et son déroulé

Cette production de déroulé permet au visiteur comme au scientifique d'appréhender le décor dans son ensemble, en effet le plus souvent les vases sont présentés en vitrine et ne permettent pas l'observation de tout le décor.

Conclusion

Notre étude devait s'atteler à montrer quels pouvaient être les apports de la photogrammétrie et plus largement ceux de la modélisation 3D à la muséologie, en particulier sur leurs capacités à générer des modèles 3D photoréalistes et à proposer des outils d'aide au travail des conservateurs.

Ainsi nous avons présenté une approche de la modélisation 3D se basant sur la photogrammétrie rapprochée et utilisant deux procédés : projection de cibles lumineuses, extraction de primitives dans le but d'une généralisation. L'extraction des primitives a été simplifiée par l'utilisation du logiciel Photomodeler. Et nous avons proposé une solution originale pour le placage des textures (Drapés).

Puis, nous nous sommes axés sur la valorisation de l'ensemble de ces modèles 3D, afin de proposer des solutions techniques pour la conservation préventive, la scénographie, la gestion des collections et le partage de données.

Ainsi, nous pouvons affirmer que la photogrammétrie rapprochée a su être efficace et satisfaisante mais aussi bon marché pour l'acquisition des données. En effet, il nous faut comparer cette technique avec l'utilisation de scanners 3D par exemple. Ces nouveaux produits (Leica HDS, Trimble GS Mensi) sont onéreux à l'achat mais ils présentent de très bons résultats concernant l'acquisition (précision, densité).

Dans notre cas, l'utilisation d'un tel matériel n'était pas envisageable, d'autant plus que ces appareils ne fournissent pas de modèles surfaciques mais un nuage de points. Ce dernier doit encore subir les mêmes traitements que nous avons décrits.

Finalement, notre approche de la numérisation 3D a été testée sur quatre-vingt œuvres d'art et a permis la création de profils (caractérisation des œuvres), la mise en ligne d'une visite virtuelle, la réalisation d'une base de données 3D de la collection ou encore la production de déroulés et la reconstruction de pièces

manquantes. Nous pouvons dire que ce projet n'en est qu'à ses balbutiements vue l'ampleur de la mission de conservation. ●

Références

- [AME 98] Amenta N., Bern M., Kamvysselis M., [1998], *A New Voronoi-Based Surface Reconstruction Algorithm*, ACM Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH), p. 415-421.
- [BOI 02] Boissonnat J.D., Cazals F., [2002], *Smooth Surface Reconstruction via Natural Neighbour Interpolation of Distance Functions*, Computational Geometry - Theory and Application, 22(1).
- [Eos systems, 03] Eos systems, Inc., [2003], *Photomodeler Pro User's Manual*, Version 5, Vancouver, B.C., Canada.
- [FAU 93] O. Faugeras, [1993], *Three dimensional computer vision : a geometric viewpoint*, MIT press.
- [HAR 00] Hartley R., Zisserman A., [2000], *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, juin 2000.
- [MOR 00] Morris D., Kanade T., [2000], *Image-Consistent Surface Triangulation*, Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hilton Head Island, South Carolina, USA.

Contact

Sébastien VAREA
ttvarea@yahoo.fr

ABSTRACT

This paper reports an approach based on multi images photogrammetry for 3D Modeling and reshaping and proposes original technique for orientation and target location. We apply this new technique for preventive conservation and muséology. Our 3D modeling approach has been extensively tested with nearly 80 objets. We also propose to help curator's works with the creation of a 3D Data Bas, a virtual visit and study tools (unrolled).

Réalisation d'un système de stéréovision mobile routier

■ Nicolas JANVIER

Dans le cadre de l'enrichissement des bases de données routières, l'élaboration d'un système de lever topométrique mobile s'impose comme étant la solution incontestable. Ainsi, le Laboratoire de Topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne développe le projet Photobus permettant de déterminer précisément la géométrie d'une route. Mon sujet de travail de diplôme s'imbrique dans cette problématique et se propose de réaliser un système de stéréovision mobile de précision submétrique, en s'inscrivant dans une stratégie low cost et open source. Sa singularité réside principalement dans l'utilisation de capteurs d'imagerie basés sur la technologie CMOS. Le concept est l'acquisition de clichés géoréférencés afin d'autoriser une restitution photogrammétrique pour localiser les éléments d'intérêts (c'est-à-dire l'axe, les panneaux de signalisation et la largeur des voies), à partir d'un système GPS bi-antenne.

Le Laboratoire de Topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne met au point un système de lever topométrique mobile pour déterminer la géométrie d'une route : le Photobus. Ce projet s'inscrit dans le cadre de l'enrichissement des bases de données routières, via la collecte d'informations telles que la position précise de l'axe de la route, des panneaux de signalisation, ainsi que la détermination du nombre et de la largeur des voies. Ce travail de fin d'études s'inscrit dans le cadre de ce projet et consiste en la réalisation d'un système de stéréovision mobile de précision submétrique en respectant une stratégie de prix bas pour la partie matériel, et en privilégiant l'utilisation de logiciels issus de la communauté libre d'Internet.

Un système de stéréovision mobile est un cas particulier de "mobile mapping system" puisqu'il résulte de la fusion d'une composante localisation, via un système GPS bi-antenne dans ce travail, et d'une composante imagerie, soit ici deux caméras de type CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor).

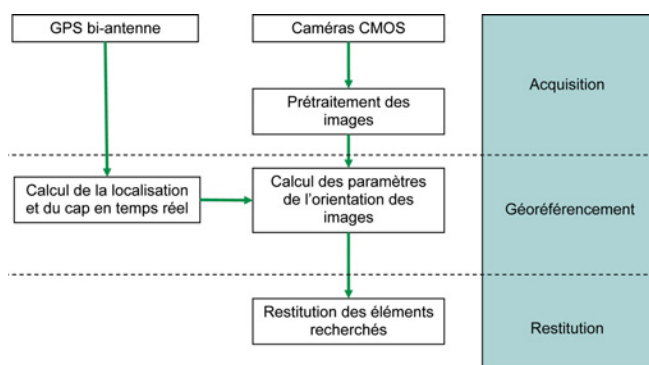


Figure 1 : Principe de fonctionnement du système de stéréovision mobile.

L'investigation a sensiblement été orientée sur la composante imagerie, et la stratégie open source a nécessité la conception et la réalisation de programmes pour l'orientation des images et la restitution des objets et ce, à partir de librairies librement accessibles sur Internet.

Généralités sur les capteurs d'images numériques

Un capteur d'images numériques exploite l'effet photoélectrique de manière à mesurer l'intensité du flux lumineux incident. Les deux types de capteur existants sont les capteurs CCD (Charge-Coupled Device) et les capteurs CMOS. La différence primordiale entre ces deux technologies réside dans l'étape de conversion charge tension. Pour un capteur CCD, cette phase est effectuée juste avant la diffusion de l'image vers l'extérieur, tandis que pour un capteur CMOS, elle a lieu au niveau même du pixel.

Ces deux technologies possèdent un rendement quantique similaire dans la gamme des visibles, de l'ordre de 90%. Le CCD est incontestablement la référence pour les applications requérant un faible niveau de bruit, une grande résolution d'image et pour les applications à faible éclairage. Outre un prix et un encombrement moindres à matrice pixellaire équivalente, la technologie CMOS confère aux images acquises un contenu plus riche, mais au détriment de la qualité. Elle autorise aussi un accès indépendant à chaque pixel par une technique d'adressage x-y et permet ainsi de focaliser l'acquisition sur des régions d'intérêt. Enfin, cette technologie offre la possibilité de rassembler l'ensemble des fonctions d'une caméra dans un seul boîtier et permet même de réaliser des capteurs "intelligents" qui embarquent des fonctionnalités de traitement d'image. Elle présente une vitesse d'acquisition élevée

Capteur CMOS logarithmique

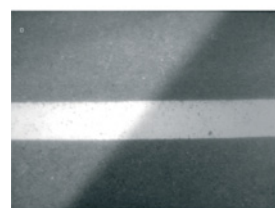
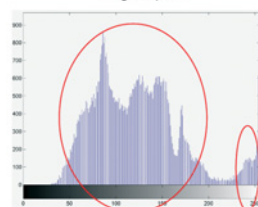


Image acquise

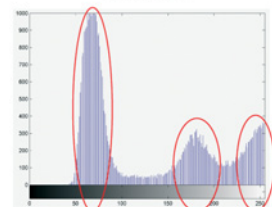


Histogramme correspondant

Capteur CCD



Image acquise



Histogramme correspondant

Figure 2 : Comparaison d'une image acquise avec un capteur CMOS logarithmique et un CCD.

et le traitement peut être effectué dans la foulée. La technologie CMOS logarithmique est parfaitement adaptée au Photobus puisqu'elle possède une bonne réaction à l'illumination en évitant la saturation. Ceci est particulièrement utile en lever routier où les conditions d'éclairage varient fortement entre les zones d'ombre et de soleil.

Etude du capteur d'imagerie Ethercam

L'Ethercam, fabriquée par Neuricam, est un système de vision complet combinant les fonctions d'acquisition et de traitement d'images dans un boîtier compact. Les images brutes ou interprétées sont transmises à un ordinateur client via une connexion Ethernet 10 Mbps. Une interface série RS-232 et trois lignes I/O opto-isolées autorisent une acquisition d'image synchronisée avec le temps GPS. Cette caméra est équipée d'un capteur monochromatique CMOS de taille VGA. La réponse du pixel est une fonction logarithmique de l'intensité lumineuse, conférant au capteur une gamme dynamique de six décades (120 dB). Comme pour tout capteur

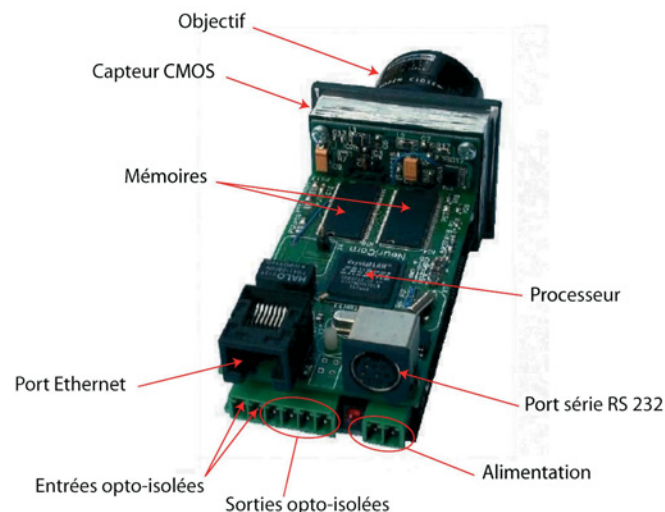


Figure 3 : Capteur d'imagerie Ethercam.

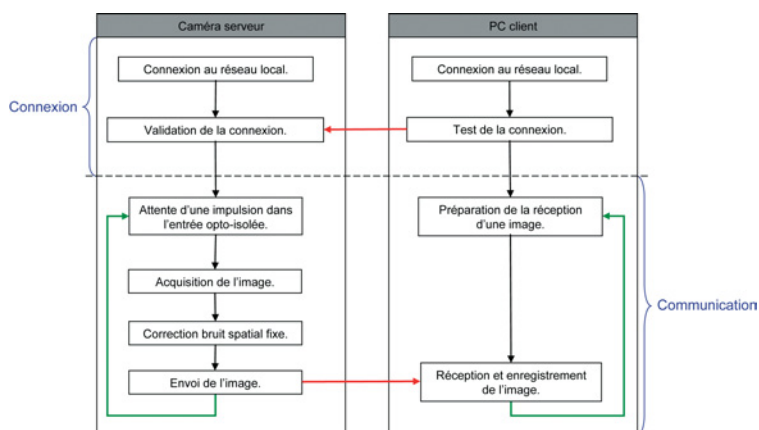


Figure 4 : Architecture et interaction des programmes serveur et client.

CMOS, les images brutes sont fortement entachées du bruit spatial fixe. La correction peut directement être effectuée sur la caméra avant le transfert vers l'ordinateur client.

L'Ethercam est entièrement programmable, sa gestion se découpe en trois parties : communication, acquisition et traitement de l'image. L'interaction de la caméra avec l'ordinateur fonctionne selon le principe du LAN (Local Area Network ou réseau local). Deux programmes interagissent : un serveur pour l'acquisition et le traitement des images par la caméra, et un client pour l'enregistrement des images sur l'ordinateur. L'architecture des programmes serveur et client est similaire et composée de deux séquences : une routine de connexion et une boucle de communication, comme illustrée sur la figure 4. Le traitement effectué se limite à la correction du bruit spatial fixe afin de conserver une cadence d'acquisition des images élevée.

Enfin, l'étalonnage des deux caméras a été effectué à l'aide de Camera Calibration Toolbox for Matlab de J.-Y. Bouguet, gratuitement disponible sur Internet¹. L'avantage de cette boîte d'outil est qu'elle ne nécessite pas de polygone d'étalonnage puisqu'elle exploite les images d'un damier de carrés de côtés connus. La mise en œuvre est ainsi simplifiée, mais l'estimation des paramètres, notamment celle de la focale, est moins optimal qu'avec un polygone car les points connus sont disposés sur une surface

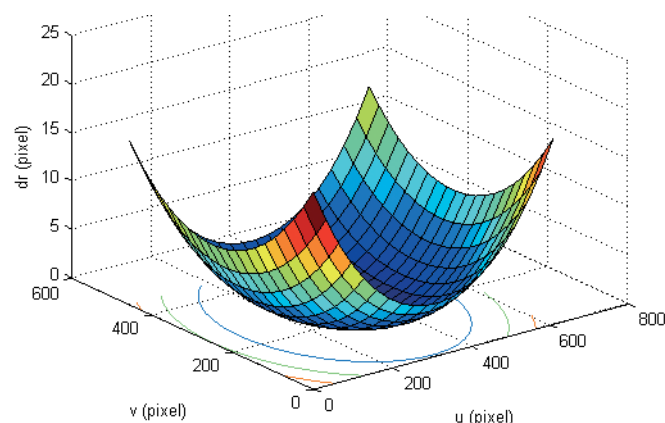


Figure 5 : Modélisation de la distorsion pour une Ethercam avec CCT for Matlab de J.-Y. Bouguet.

■ ■ ■ et non dans un volume. Les prises de vue du damier sont réalisées à différentes distances et sous plusieurs angles afin d'estimer au mieux les paramètres intrinsèques. Le calcul des éléments de l'étalonnage est basé sur l'exploitation de la relation entre les coordonnées image et terrain des points mesurés, soit l'équation de colinéarité. En connaissant les deux coordonnées il est alors possible de calculer les corrections à apporter pour améliorer l'exactitude de la relation. La distorsion des deux objectifs est très importante en bord d'image, puisque de l'ordre d'une quinzaine de pixels. Des comparaisons avec d'autres solutions de calibration, comme BINGO, ont été menées afin de vérifier la qualité de l'étalonnage réalisé.

Conception et réalisation du système de stéréovision mobile

Le système de stéréovision mobile est une plateforme regroupant les deux capteurs d'imagerie et le dispositif de localisation afin de collecter des couples d'images géoréférencées pour restituer les objets d'intérêt. Une telle opération nécessite la connaissance des paramètres d'orientation interne et externe. Les premiers ont été déterminés lors de l'étalonnage des caméras et sont constants au cours du temps. Les seconds doivent être collectés au cours du déplacement du système. Le géoréférencement direct des images sans points d'appui est basé sur l'extrapolation des paramètres d'orientation et conditionne directement la qualité de la restitution. Il passe par une localisation dynamique précise des caméras à partir des données du GPS. Ceci nécessite une synchronisation parfaite des capteurs d'imagerie et de localisation sur une base de temps commune. Le principe de synchronisation repose sur l'émission d'une impulsion par le port série d'un ordinateur vers un synchronisateur qui divise le signal en trois impulsions qui vont simultanément déclencher les deux acquisitions d'images et la datation par le récepteur GPS.

La réalisation d'une structure rigide garantissant un repositionnement subcentimétrique des caméras CMOS sur le toit du véhicule est indispensable pour fixer les positions relatives des deux antennes et des deux caméras. Afin de réduire les effets de la distorsion, les caméras sont inclinées de façon à ramener la zone d'intérêt au centre de l'image. La base entre les deux caméras influence directement la précision de la restitution, mais elle est

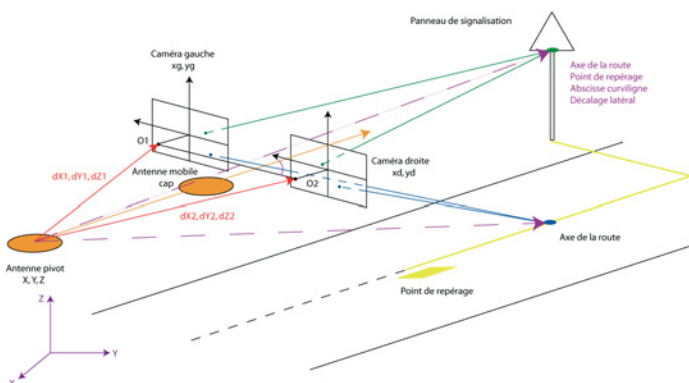


Figure 6 : Système de stéréovision mobile.

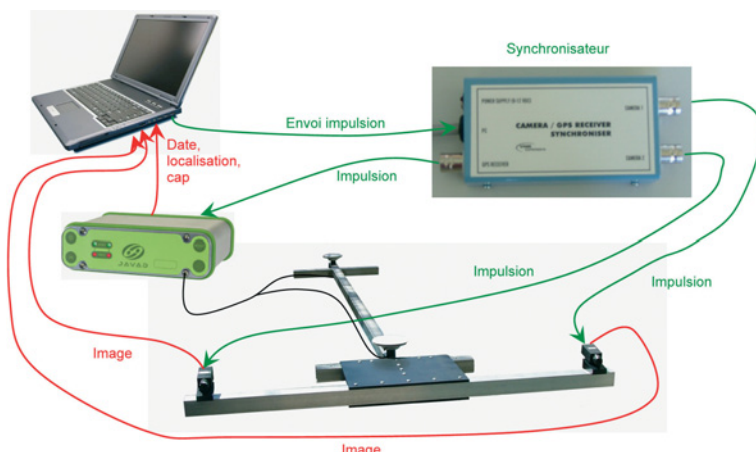


Figure 7 : Fonctionnement du système de stéréovision mobile conçu.

limitée par la largeur du véhicule et doit respecter la législation routière. La mise au point est réalisée à la distance du plan dans lequel sont situés les objets à restituer. Pratiquement, la profondeur de champ est déterminée en tenant compte de la diversité des scènes à observer variant d'une simple route à une 2x3 voies. Il est ensuite aisé d'effectuer la mise au point en fonction du premier et du dernier plan net. Le démarrage du système demande une bonne organisation. Le récepteur GPS doit être mis en marche en premier pour récupérer des observations d'initialisation et s'assurer d'un nombre de satellites visibles suffisant. Ensuite les caméras doivent être démarrées et connectées au LAN² séparément. Enfin le synchronisateur est activé et le bon fonctionnement du dispositif peut être vérifié.

La vitesse du véhicule lors des deux tests réalisés oscillait entre 30 et 40 km/h tandis que la cadence d'acquisition est fixée à 2 images par seconde. Il est primordial de garder une vitesse constante pour un espacement entre les couples d'image régulier. Il existe en effet une interaction entre la vitesse du système, la cadence d'acquisition et l'espacement entre deux couples successifs. Le nombre de couples sur lesquels un point sera visible, donc la qualité de restitution, dépend de la vitesse du véhicule.

Géoréférencement direct des images

Le concept du géoréférencement direct autorise l'acquisition d'images géoréférencées, c'est-à-dire que chaque cliché se voit attribuer indépendamment des autres ses paramètres de localisation et d'orientation. Dans le cadre de ce travail, le géoréférencement direct est basé sur la transformation repère antenne - repère image, qui est fixe au cours du déplacement du véhicule grâce à la structure. Cette transformation implique l'expression des positions des deux antennes GPS dans les repères images. Les deux antennes définissent un repère, dénommé repère antenne, dont l'origine est l'antenne arrière, le plan xOy est horizontal, l'axe Ox dirigé selon la

(1) http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

(2) Local Network Area ou réseau local, ici le protocole d'accès est Ethernet.

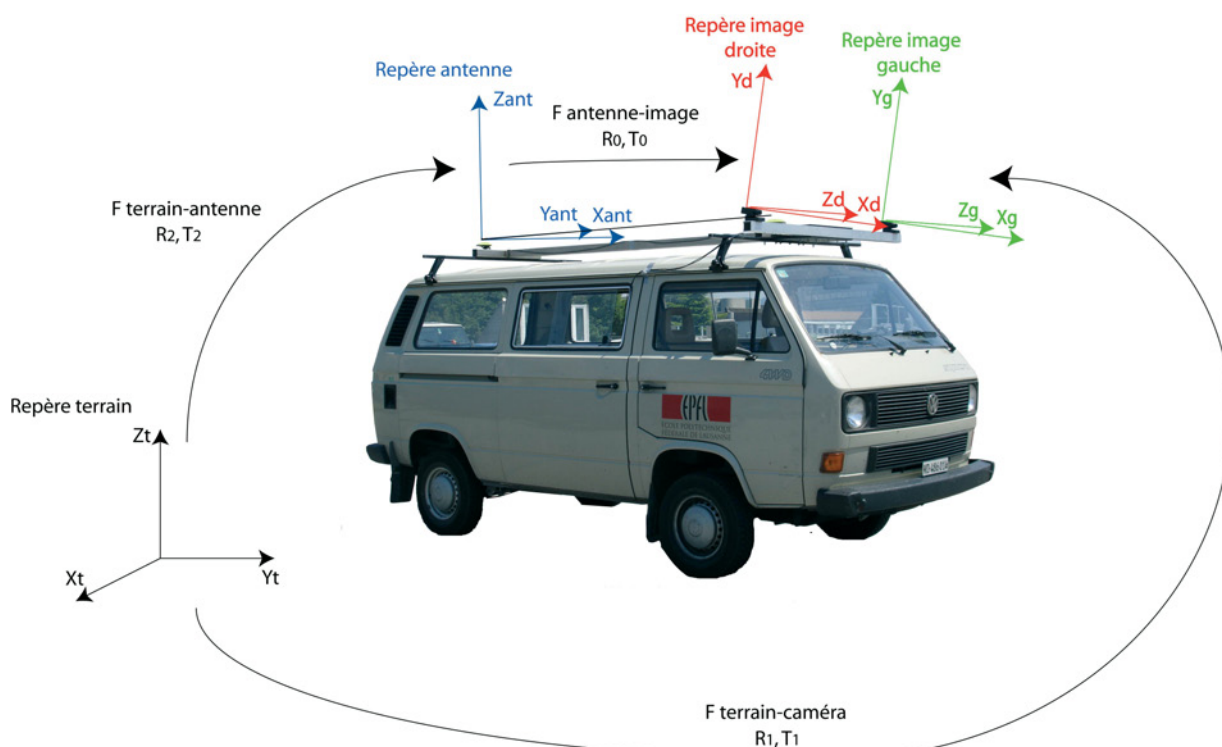


Figure 8 : Les différents repères utilisés.

droite définie par les deux antennes et l'axe Oz vertical. L'axe Oy complète le repère de façon à ce qu'il forme une base orthogonale directe. Les deux repères images sont donc fixes par rapport au repère antenne. Cette transformation sera alors déterminée lors d'un calibrage et ensuite utilisée pour géoréférencer les images acquises en la combinant avec la transformation entre le repère terrain, afin d'obtenir la localisation et l'orientation des images dans le repère terrain à partir des coordonnées des deux antennes.

Les passages entre ces repères sont régis par des transformations 3D qui peuvent être modélisées de la façon suivante :

$$\text{Repère antenne - caméra } F_0 : \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} = R_{\text{topo}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{antenne}} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = R_0 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{antenne}} + T_0$$

$$\text{Repère caméra - terrain } F_1 : \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{terrain}} = R_{\text{topo}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = R_1 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} + T_1$$

$$\text{Repère terrain - antenne } F_2 : \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{antenne}} = R_s \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{terrain}} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = R_2 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{terrain}} + T_2$$

Le principe de détermination de la fonction de géoréférencement consiste à réaliser des mesures GPS et acquérir des couples d'images simultanées devant un polygone composé de cibles connues en coordonnées. En combinant l'acquisition de mesures GPS avec des prises d'image du polygone, il est possible de calculer la transformation repère caméra - repère terrain (F1), grâce à l'équation de colinéarité qui fournit la matrice de rotation entre le repère antenne et terrain ainsi que les coordonnées du sommet dans le repère terrain. Ensuite, la transformation entre le repère terrain et celui des antennes GPS est aisément obtenu en résolvant l'équation F2,

après avoir exprimées les coordonnées terrain des antennes dans le repère antenne :

$$X_{\text{antenne arriere}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; X_{\text{antenne avant}} = \begin{bmatrix} \sqrt{(X_{\text{terrain arriere}} - X_{\text{terrain avant}})^2 + (Y_{\text{terrain arriere}} - Y_{\text{terrain avant}})^2} \\ 0 \\ Z_{\text{terrain arriere}} - Z_{\text{terrain avant}} \end{bmatrix}$$

Les éléments recherchés sont alors obtenus en composant les transformations F1 et F2 :

$$R_0 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} + T_0 = R_2 \cdot \left(R_1 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{caméra}} + T_1 \right) + T_2 \quad \text{soit} \begin{cases} R_0 = R_2 \cdot R_1 \\ T_0 = R_2 \cdot T_1 + T_2 \end{cases}$$

Ainsi au moment de la restitution, chaque image sera géoréférencée à l'aide des formules suivantes :

$$X_S^{\text{terrain}} = X_{\text{arriere}}^{\text{terrain}} + R_2^{-1} \cdot T_0$$

$$R = R_2^{-1} \cdot R_0$$

La transformation F2 dépend de la position du véhicule au moment de la mesure, elle est donc calculée pour chaque couple d'images. Il convient de remarquer que le roulis et le tangage sont négligés. Du fait de la position des deux antennes, le roulis n'est pas accessible, mais comme le dévers de la route varie de 2.5% à 5%, l'erreur commise est minime puisqu'inférieure au centimètre. Les pentes rencontrées usuellement sur les routes sont de l'ordre de 6%, soit un tangage de 3.5°. Le cadre de ce travail étant l'évaluation de la stéréovision mobile CMOS, les acquisitions seront réalisées en milieu découvert et relativement plat, les pentes seront donc largement inférieures à 6%. Le tangage sera alors de l'ordre de 1°, il peut donc être négligé.

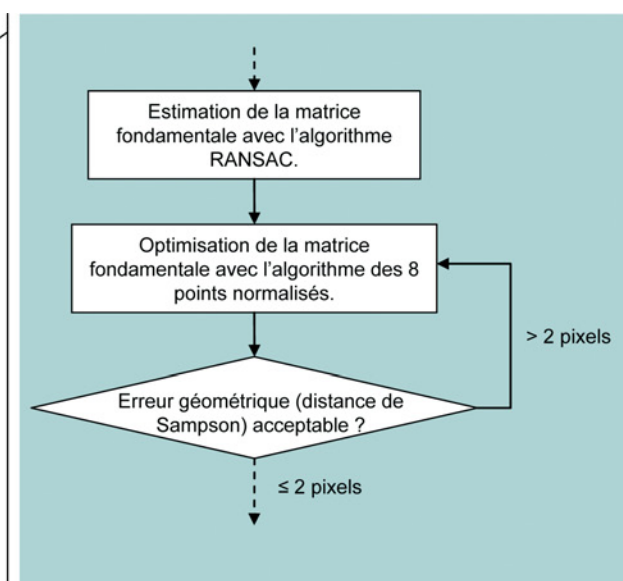
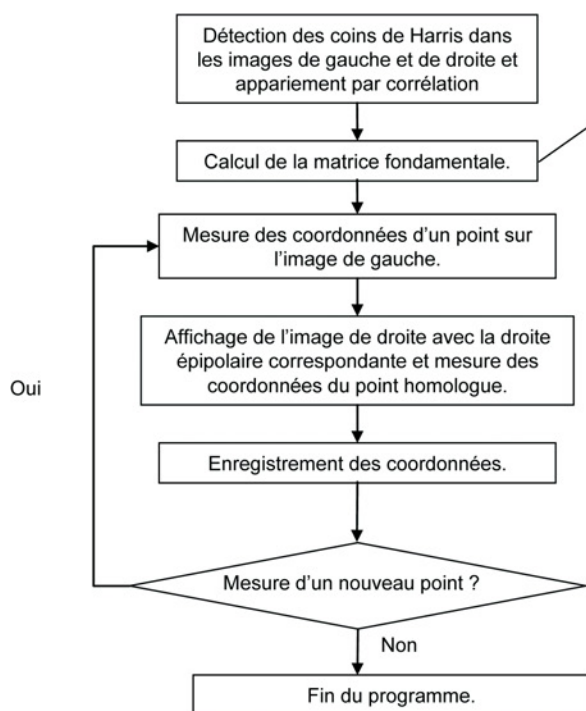


Figure 9 : Organigramme du module de mesure.

Identification des caractéristiques d'une route par restitution photogrammétrique

La restitution implique la mesure des coordonnées image des points d'intérêt. Elles sont ensuite introduites dans les équations inverses de la colinéarité pour l'obtention des coordonnées terrain :

$$\begin{cases} X = X_s + (Z - Z_s) \frac{r'_{11}x + r'_{12}y - r'_{13}c}{r'_{31}x + r'_{32}y - r'_{33}c} \\ Y = Y_s + (Z - Z_s) \frac{r'_{21}x + r'_{22}y - r'_{23}c}{r'_{31}x + r'_{32}y - r'_{33}c} \end{cases}$$

avec (X,Y,Z) les coordonnées terrain du point mesuré, (x,y) les coordonnées image du point mesuré, (X_s,Y_s,Z_s) les coordonnées terrain du sommet perspectif de la caméra, c la focale et r'_{ij} les termes de la matrice de rotation de l'image considérée.

Tout d'abord, un module de mesure des coordonnées image a été développé en utilisant la géométrie épipolaire afin de faciliter l'identification des points d'intérêt dans l'image de droite. Sa mise en œuvre s'appuie sur deux boîtes d'outils librement accessibles sur Internet : *MATLAB Functions for Computer Vision and Image Analysis*³ de Peter Kovesi et *Structure and Motion Toolkit for Matlab*⁴ de Philip Torr. La mise en œuvre de la géométrie épipolaire repose sur un calcul de la matrice fondamentale à partir des coins de Harris dans les images de gauche et de droite, qui sont ensuite appariés via une comparaison basée sur le maximum de corrélation. La matrice fondamentale est ensuite estimée à l'aide de l'algorithme de RANSAC, qui permet

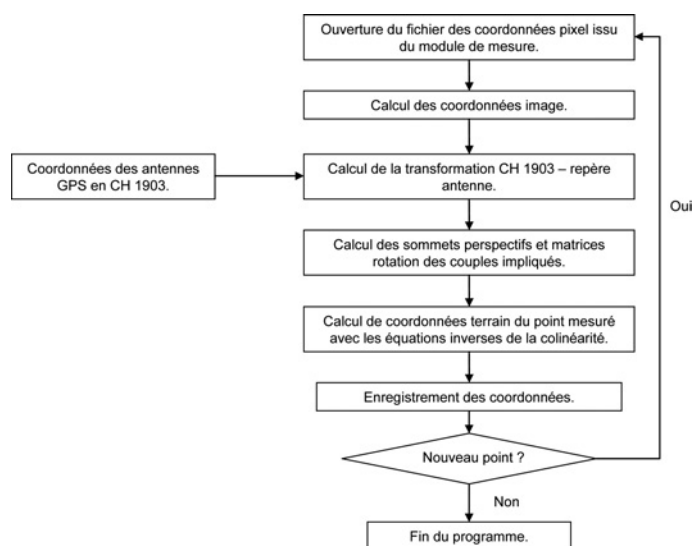


Figure 10 : Organigramme du module de restitution.

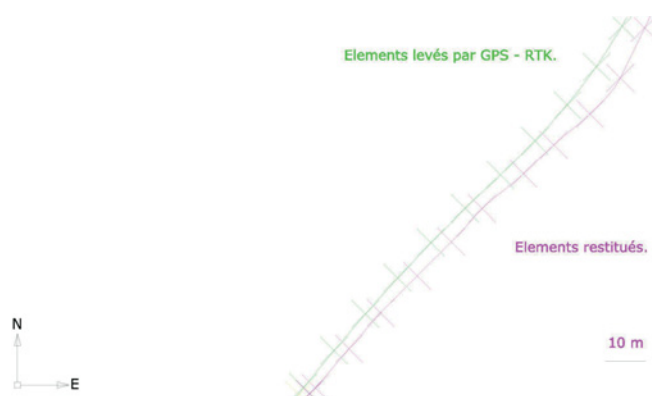


Figure 11 : Plan des axes obtenus par levé GPS-RTK et par restitution.

(3) <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>

(4) <http://research.microsoft.com/~philip/torr/>

d'éliminer les erreurs d'appariement et d'obtenir un premier résultat fiable. Le calcul est ensuite affiné de façon itérative avec l'algorithme des 8 points (Longuet - Higgins, revu par Hartley - 1997), le critère d'itération étant une distance de Sampson inférieure à deux pixels.

Ensuite, un module de restitution a été conçu pour appliquer aux coordonnées précédemment mesurées, les équations inverses de la condition de la colinéarité en fonction des données de géoréférencement direct. Il est indispensable de s'assurer que les paramètres fixes dans la fonction de géoréférencement respectent bien la géométrie des deux caméras déterminée par la structure les accueillant.

Les premiers résultats mettent en évidence une erreur importante de 4 à 5 mètres dans le sens latéral. Mais la précision n'a pas pu être vraiment estimée puisqu'un problème de communication est venu perturber le test. En effet un décalage au niveau de la numérotation des images a été remarqué, l'image de gauche numéro 882 correspond à l'image de droite numéro 875. Un phénomène d'embouteillage a vraisemblablement eu lieu au niveau de la connexion Ethernet.

Conclusion

L'étude des caméras CMOS logarithmiques montrent qu'elles sont parfaitement adaptées à la capture d'image en extérieur, notamment en zones soumises à de brusques variations d'éclairement. De plus, ces capteurs intelligents autorisent la réalisation de traitements embarqués afin de soulager l'ordinateur hébergeant le logiciel de mobile mapping de certaines tâches de post-traitement. De part leur coût, elles permettent de respecter pleinement la tactique de prix bas.

La conception des programmes nécessaires à la mise en place du processus photogrammétrique a pu en partie s'appuyer sur des boîtes d'outils performantes et gratuitement disponibles sur Internet. L'étalonnage des caméras et la détermination de la géométrie épipolaire ont été réalisés par ce biais avec satisfaction. Les logiciels de mesure et de restitution ont été spécialement développés en utilisant les techniques de la photogrammétrie. La stratégie d'*open source* est ainsi respectée.

La conception du dispositif d'acquisition a débouché sur l'élaboration d'une structure accueillant les capteurs et la détermination de la méthode de synchronisation. Le géoréférencement a ensuite pu être réalisé à l'aide d'un système GPS bi-antenne exploitant le concept de station de référence mobile.

Les éléments essentiels dans l'élaboration d'un système de stéréovision mobile bon marché et efficace sont une parfaite synchronisation des capteurs d'imagerie et de localisation, un étalonnage des caméras optimal, ainsi qu'un géoréférencement direct précis. Ces deux dernières conditions ont été remplies. ●

Bibliographie

- Chong. A. K. (2004)** *Optimizing the accuracy of a low-cost photogrammetric motion and study system*, University of Otago, New Zeland, The Photogrammetric Record 19(108) : 296-310, December.
- Gontran. H. (2005)** *Thèse en préparation*, Laboratoire de Topométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Gontran. H., Skalous. J. et Gilléron. P.-Y. (2004)** *Photobus : en route vers la cartographie mobile en temps réel*, Laboratoire de Topométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Géomatique Suisse, septembre.
- Heikkilä. J., Silvén. O. (1997)** *A four step camera calibration procedure with implicit image correction*, Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, Finland, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97), San Juan, Puerto Rico, p1106-1112.
- Luhmann. T. (2000)** *Nahbereichsphotogrammetrie*, Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Wichmann, Heidelberg, Deutschland.
- Torr. P. H. S. (2002)** *A Structure and Motion Toolkit in Matlab "Interactive Adventures in S and M"*, Technical Report MSR-TR-2002-56, june.
- Notices d'utilisation Etherecam** *User Manual, Programmer Manual*, axLinux - cdb89712.

Contact

Nicolas JANVIER
nico.janvier@wanadoo.fr

ABSTRACT

Within the framework of the improvement of road databases, the design of a mobile mapping system asserts oneself to be the undisputable solution. In this way, the Geodetic Engineering Laboratory at the Swiss Federal Institute of Technology (EPFL) has developed the Photobus project to determine the geometry of a road with accuracy. The topic of my Master's Thesis tackles this problem and consists in carrying out a mobile stereovision system with a submetric accuracy, within the scope of a low cost and open source strategy. Its singularity resides in the use of image sensors based on CMOS technology. The concept is the acquisition of georeferenced pictures so as to allow a photogrammetric plotting of the elements of interest (i.e the road axis and signs, as well as the width of the lanes). The adopted strategy leads to realize the programs needed to plot, by using open source toolboxes if possible.

Mise en œuvre de l'arrêté sur les classes de précision

Retour d'expérience de la Ville de Nice

■ Ludovic ANDRES

Voilà bientôt trois ans que le nouvel arrêté définissant les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'Etat, les collectivités locales et leurs établissements publics, ou exécutés pour leur compte, est paru au Journal Officiel (Arrêté du 30 Octobre 2003), en remplacement de l'arrêté sur les Tolérances de Levers (Arrêté du 21 Janvier 1980). Une durée suffisamment longue pour pouvoir maintenant estimer son niveau d'application, ses bienfaits, les difficultés rencontrées dans le cadre de sa mise en œuvre, ou les éventuelles évolutions souhaitables. Ces points, qui vont être examinés en détail par le Groupe de Travail Obligation de Rattachement du Conseil National de l'Information Géographique (CNIG) devraient permettre d'obtenir prochainement à travers la variété et la représentativité des acteurs qui composent le groupe, et grâce à leurs retours d'expérience, une vision élargie et objective de la mise en application du décret, ainsi que des propositions concrètes d'évolution. En attendant ces conclusions, la Ville de Nice apporte à travers cet article, son simple témoignage et ses réflexions, sur la mise en œuvre de cet arrêté.

Dès fin 2003, soit peu de temps après sa publication, toute une série d'articles explicatifs était parue dans les revues spécialisées tels XYZ ou *Géomètre* afin d'en favoriser la compréhension et inciter à son utilisation.

La Ville de Nice (cf. Delerba et Andres, 2003) relevait alors un fort intérêt pour cette nouvelle réglementation conduisant à changer la manière de réaliser une commande publique de levé topographique, ainsi que son contrôle, d'autant que cela s'inscrivait en parfaite har-

monie avec le décret d'application de l'article 53 de la loi d'Aménagement et de Développement Durable qui a défini depuis le 26 décembre 2000 le RGF93 (Décret n° 2000-127) comme le nouveau système de référence en vigueur en France.

L'arrêté sur les classes de précisions

Il n'est pas nécessaire ici de s'étendre longuement sur la description détaillée de l'arrêté et sur ses avantages puisqu'une large communication existe maintenant sur ce sujet. Il convient cependant de se remémorer rapidement les points clefs qui le rendent particulièrement attrayant et son principe de fonctionnement.

■ Rappel des avantages et objectifs

Tout d'abord, il doit faciliter les relations entre les donneurs d'ordre et les prestataires exécutant les divers travaux topographiques en constituant une interface claire et simple entre eux :

- au moment de la commande par la définition des classes de précision à respecter
- au moment de la recette par la réalisation de contrôles de précision

Il incite également à effectuer des spécifications techniques en termes de précision qui correspondent aux besoins réels, puisque la difficulté et le coût liés aux contrôles dépendent aussi de la précision demandée. Il devient alors particulièrement souhaitable de ne pas imposer une précision inutilement trop grande.

Il permet ainsi à une concurrence saine et plus égalitaire de s'exercer puisque les prestataires savent désormais que leurs travaux seront soumis à une évaluation systématique, rigoureuse, et quantifiée.

Enfin, il tient compte des nouvelles évolutions techniques intervenues au niveau de la saisie et du traitement des données depuis deux décennies, et autorise le géomètre ou topographe à décider du choix de la méthode de travail et des technologies qui lui semblent les plus appropriées à la réalisation de son chantier.

■ Rappel du principe de fonctionnement

On spécifie la précision souhaitée par une classe de précision exprimée en centimètre. Nous ne sommes plus dans

une spécification de moyens, mais dans une spécification de résultats (M. Kasser, 2003).

On définit également les bases sur lesquelles les contrôles de précision seront menés.

On procède finalement au contrôle des travaux topographiques réalisés.

■ Le cadre réglementaire, les outils

On utilise un modèle d'erreur : gabarit standard ou spécifique.

On effectue le contrôle par échantillonnage :

- on spécifie le nombre d'objets que l'on va contrôler
- on procède aux mesures de contrôle "selon les règles de l'art" et en respectant un facteur de sécurité de 2 au minimum.

On respecte une méthodologie pour déterminer à partir des mesures de contrôle et du modèle d'erreur si le levé respecte la classe de précision demandée.

Enfin, il est nécessaire de souligner que l'arrêté définit trois catégories de travaux : le canevas, les objets géographiques, et les images rectifiées et cartes scannées remises en géométrie.

Première expérience de mise en œuvre à la Ville de Nice : un marché lancé en mars 2004 pour la réalisation d'une polygonale de précision

Il s'agissait de définir les prestations de topographie nécessaires à l'obtention d'une polygonale de haute précision s'étendant sur plusieurs kilomètres, pour la réalisation de travaux routiers d'une importante voie traversant la commune (Figure 1). Cette polygonale devait être établie avant la phase de travaux pour servir aux implantations et contrôles du chantier.

■ Le cahier des charges

Au départ, la précision demandée par le maître d'œuvre (la Direction des Grands Travaux d'Infrastructure de la Ville de Nice) était de 5 mm sur chacun des points, aussi bien en planimétrie

qu'en altimétrie, et ce, rattaché dans les systèmes de référence NTF et NGF - IGN69. Il s'agissait des précisions qu'il demandait par habitude, depuis "toujours" pour des travaux topographiques de ce type.

Aussi il a été nécessaire d'effectuer d'une part un petit travail d'explication sur l'importance et l'impossibilité de ce qui était demandé, et d'autre part d'analyser ensemble les besoins réels afin d'aboutir rapidement, et sans difficulté aucune, à des spécifications en termes de précision qui correspondaient réellement à leurs besoins, soit 1,5 cm au lieu de 5 mm. De même le système de référence NTF a été remplacé dans le texte par le RGF93. Cependant en confrontant à l'arrêté ces précisions de l'ordre du centimètre et demi, il est apparu qu'il serait particulièrement difficile de réaliser leur contrôle dans le système de référence légal. Il a donc été décidé de demander à ce que la polygonale aie une précision planimétrique interne de 1,5 cm et de 2,5 cm en précision totale, sans imposer de gabarit d'erreur spécifique. Cette précision interne correspondait localement aux besoins, tandis que la précision totale était suffisante pour insérer les plans d'étude dans le plan topographique existant (avec des vérifications complémentaires) et pour permettre d'établir ultérieurement le levé topographique final à intégrer dans la base de données de la Ville de Nice. Cette dernière qui comporte plus de 14 000 stations et environs 1 200 000 points de semis levés en x, y et z dans les systèmes RGF93 projection Lambert 93 et NGF - IGN69, couvre 90 % du corps de rue du domaine public, sur les 7 200 hectares de la commune.

Afin de préserver la qualité interne de la polygonale tout en disposant de coordonnées dans le système de référence légal, il a clairement été spécifié dans le cahier des clauses techniques particulières que les modalités de calcul du rattachement devraient être choisies afin de ne pas altérer la précision interne du canevas.

La Ville de Nice mettait à la disposition du titulaire les données de sa station Permanente bi-fréquence GPS intégrée

■ ■ ■ au réseau RGP de l'IGN (station NICA), qui pouvait servir au rattachement au RGF93, et une liste de repères de nivellements NGF - IGN69 récemment observés (L. Andres, 2005) pour le rattachement altimétrique. Il était demandé à ce que les coordonnées des sommets de la polygonale soient calculées et fournies dans le système géodésique local, et national.

Une trentaine de points de canevas ont été implantés, observés et calculés par le prestataire qui a remporté le marché, la société ATM (St Laurent du Var, Alpes Maritimes).

■ Les critères pour le contrôle de la précision

Restait à mettre au point la procédure de contrôle que nous avons décidé de réaliser en régie, puisque la Ville de Nice dispose d'un Service de Topographie composé d'une quinzaine d'agents compétents et du matériel approprié. Le contrôle de la précision totale a été réalisé par GPS en mode statique avec deux sessions d'observation de 3 heures par point tandis que la précision interne s'est faite de manière plus traditionnelle, au tachéomètre, en respectant les "règles de l'art" permettant d'assurer une précision meilleure que 7,5 millimètres (respect du coefficient de sécurité choisi égal à 2). Le contrôle altimétrique des repères de nivellement s'est effectué par nivellement direct en cheminement double, avec un niveau numérique de haute précision, des mires invar à code barre et en suivant un mode opératoire approprié.

En ce qui concerne la précision interne planimétrique, huit points ont été contrôlés, et la Table 1 ci-dessous présente les conditions que doivent respecter ces points en appliquant directement les prescriptions de l'arrêté avec le modèle d'erreur standard.

Quelques constats :

- En examinant l'écart moyen en position on s'aperçoit qu'il est supérieur à la classe de précision demandée de 1,5 cm. Cela peut étonner, mais est tout à fait normal puisque cette valeur intègre le fait que la mesure de contrôle n'est pas parfaite et comporte elle-même une erreur.



(source : Philippe Pen, Direction des Grands Travaux d'Infrastructure)

Figure 1 : Chantier de réalisation du doublement de la voie Mathis.

Les données en entrée	Nombre [N] d'objets de l'échantillon	8
	Classe de précision [xx] demandée	1,5 cm
	Coefficient de sécurité [C]	2
	Nombre [n] de coordonnées des objets	2
Les critères à respecter selon l'arrêté	L'écart moyen en position doit être inférieur à	1,69 cm
	Premier seuil [T1]	4,08 cm
	Deuxième seuil [T2]	6,13 cm
	Nombre maximum autorisé [N'] d'écarts dépassant le premier seuil	1
	Nombre maximum autorisé d'écarts dépassant le deuxième seuil	0

Table 1 : Conditions de précision planimétrique que doivent respecter les points contrôlés selon les prescriptions de l'arrêté sur les classes de précision, et en utilisant le modèle d'erreur standard.

- On remarquera également que le premier seuil est à 4,08 cm. Cette valeur est presque égale à 3 fois la précision demandée. Elle est importante et conduit à s'interroger si le modèle standard était dans ce cas le plus adapté à des travaux topographiques de ce type puisqu'il permet d'aller jusqu'à cette valeur et même la dépasser dans la limite de 6,13 cm pour un des huit points contrôlés.

- Le fait de devoir respecter le facteur de sécurité égal à 2 au minimum contraint à ne pas demander une précision trop grande par l'extrême difficulté que peut revêtir le contrôle.

■ L'outil de translation rotation sans facteur d'échelle

Pour vérifier le respect des valeurs, dans le cas de la précision interne d'un canevas, l'arrêté indique qu'il faut effectuer la meilleure translation et rotation sans facteur d'échelle. La difficulté a été de trouver un logiciel permettant de déterminer cette meilleure translation et rotation sans facteur d'échelle. Les logiciels de calculs topographiques ne disposaient pas encore de cette fonctionnalité. Après plusieurs recherches, il a été décidé de réaliser en interne cet outil en Visual Basic.

Dans le cas d'un contrôle de précision planimétrique interne la meilleure translation et rotation peut s'apparenter à déterminer une transformation par la méthode d'Helmert pour laquelle le facteur d'échelle serait égal à 1. Bien que simple, cette méthode d'Helmert ne permet cependant pas de contraindre directement le facteur d'échelle à 1. En effet : on sait que pour un point M dont les coordonnées sont (X_1, Y_1) dans le repère (O_1, i_1, j_1) et (X_2, Y_2) dans le repère (O_2, i_2, j_2) on peut écrire l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

lorsque (Figure 2) :

- (T_x, T_y) représente le vecteur translation entre les repères (O_2, i_2, j_2) et (O_1, i_1, j_1)
- E est le facteur d'échelle défini de telle sorte que $\|i_1\| = \|j_1\| = E \cdot \|i_2\| = E \cdot \|j_2\|$
- θ est l'angle de rotation entre les repères (O_1, i_1, j_1) et (O_2, i_2, j_2)

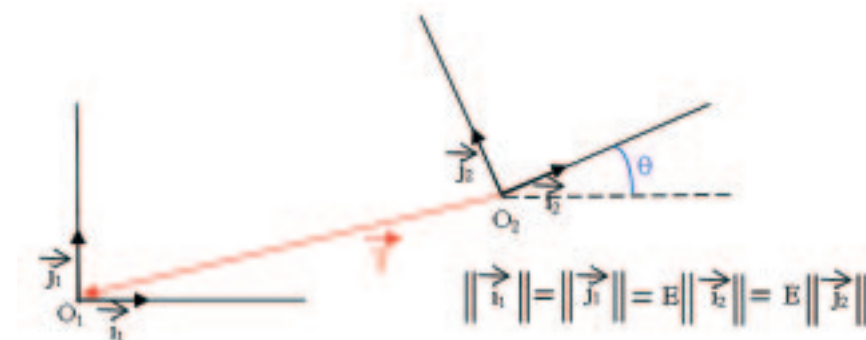


Figure 2 : Représentation d'une translation, rotation, avec facteur d'échelle.

En pratique, les points mesurés lors du contrôle pourront s'apparenter aux points connus dans le système (O_2, i_2, j_2) tandis que ceux initialement fournis par le prestataire seront considérés comme étant exprimés dans le système (O_1, i_1, j_1) . En posant $a = E \cos \theta$ et $b = E \sin \theta$ et pour N points contrôlés, on arrive au système d'équations suivant, formulé sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} X_2^i \\ Y_2^i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^i & Y_1^i & 1 & 0 \\ Y_1^i & -X_1^i & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

où i est l'indice du point mesuré et $1 \leq i \leq N$

Ce système comporte 2N équations et quatre inconnues. Avec au minimum deux points contrôlés on pourra donc calculer les paramètres a, b, T_x et T_y . En pratique un nombre important de points vont être contrôlés et vont conduire à une surdétermination de ce système d'équations. Du fait des erreurs liées aux mesures, ces équations apparaîtront comme étant toutes indépendantes. On peut résoudre de tels systèmes par la méthode d'approximation par les moindres carrés. Mais rien n'impose que $\sqrt{a^2 + b^2}$ soit égal à 1, et l'on aura donc *in fine* $E \neq 1$.

Pour remédier à ce problème, et donc afin d'assurer un facteur d'échelle égal à 1 on procède en trois étapes, de la manière suivante :

- On calcule le meilleur jeu de paramètres de translation, rotation avec facteur d'échelle.
- On applique aux coordonnées du prestataire les paramètres trouvés de

rotation et translation, en imposant le facteur d'échelle égal à 1 : on se ramène ainsi dans un cas où l'angle de rotation entre les deux systèmes de coordonnées est très faible, sans avoir déformé la géométrie interne des jeux de coordonnées.

- Dans ces conditions de petit angle θ , on peut procéder à un développement limité de premier ordre pour les sinus et cosinus, et fixer E égal à 1. On obtient alors le système d'équations initial suivant qui permettra de déterminer la meilleure translation et rotation sans facteur d'échelle :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \theta \\ -\theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

On aboutit finalement au tableau de résultats ci-dessous démontrant que le prestataire a bien respecté la classe de précision demandée, puisque le contrôle trouve une erreur moyenne égale à 0,96 cm et le plus grand écart est égal à 1,5 cm ce qui est bien inférieur aux bornes T1 et T2.

Les contrôles de la précision planimétrique totale, ainsi que des précisions altimétriques (interne et totale) n'ont révélé dans le cadre de ce chantier aucune difficulté particulière de mise en œuvre.

Le travail a donc pu être évalué de manière rigoureuse et quantifiée. Il s'avère être conforme aux prescriptions demandées, voire même d'une qualité supérieure.

C'est grâce à cette première expérience concrète de mise en œuvre de l'arrêté, que nous avons pu aborder d'une manière plus prudente la rédaction

Matricule	X	Y	X_Contrôle	Y_Contrôle
9002	9955.824	4914.152	10000.000	4903.452
201	10000.000	5000.000	10000.000	5000.000
240	9921.798	4832.771	10006.985	4815.527
241	9806.078	4689.017	9969.870	4634.753
202	9766.535	4599.779	9975.541	4537.321
206	9750.608	4546.149	9985.918	4482.354
9001	9697.848	4515.597	9952.988	4431.051
9003	9692.681	4389.226	10006.205	4316.317

Ex	Ey	Epos
-0.0028	-0.0117	0.0120
-0.0017	-0.0111	0.0112
-0.0001	-0.0056	0.0056
0.0030	-0.0074	0.0080
0.0021	0.0024	0.0032
0.0017	0.0095	0.0097
0.0049	0.0139	0.0147
-0.0071	0.0100	0.0122

Som(Ex)	Som(Ey)	Emoy_pos
0	0	0.0096

Table 2 : Présentation des résultats du contrôle de la classe de précision planimétrique interne de la polygonale de précision de la Voie Mathis.

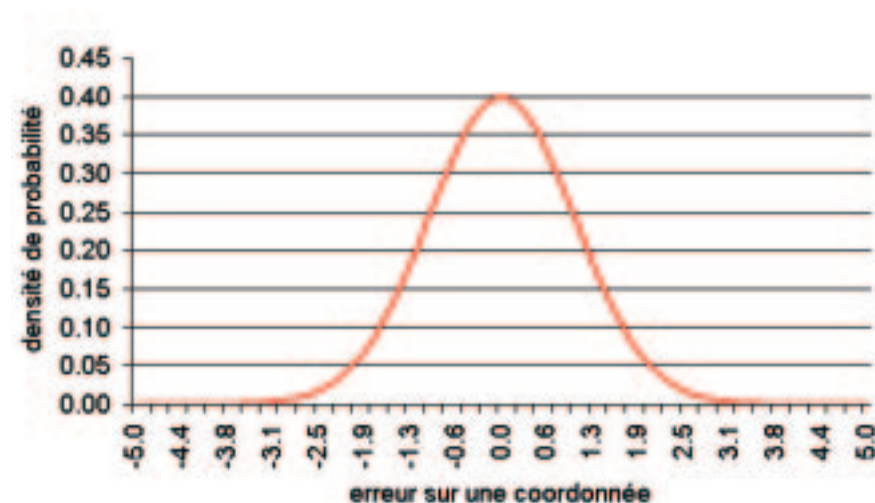


Figure 3 : Densité de probabilité d'une variable aléatoire suivant une loi normale centrée, d'écart type égal à 1, et représentant l'erreur de mesure sur une coordonnée.

d'un nouveau cahier des charges pour un autre marché de levés topographiques. Une étude d'application plus poussée s'est logiquement révélée nécessaire et a permis d'affiner la compréhension de l'arrêté. Elle a soulevé, sur le canevas et les objets géographiques à traiter, certains aspects à éclaircir pour permettre une mise en œuvre appropriée de ce nouvel arrêté.

Réflexions sur le modèle standard

L'exemple d'application de la polygonale de précision interpelle sur l'adéquation du modèle standard pour la réalisation de points de canevas de précision centimétrique.

■ Etude des seuils T1 et T2

Le modèle standard s'appuie sur l'hypothèse que les erreurs de mesures suivent une loi gaussienne. Cela paraît bien évidemment logique, puisqu'une large part des phénomènes physiques environnants peuvent être modélisés par cette loi normale. Des erreurs de mesures topographiques devraient donc très probablement la suivre dans des conditions "normales" de travail.

Cependant les seuils T1 et T2 qui résulteraient de son utilisation paraissent trop élevés au regard de la précision initiale demandée. Pour mieux comprendre l'importance de ces valeurs, il convient de revenir quelques instants et de manière simplifiée, sur le processus de "fabrication" des seuils T1 et T2 (P. Sillard, 2003).

L'erreur sur chaque coordonnée, individuellement, est supposée suivre une loi normale. La figure 3 ci-contre, illustre pour une coordonnée, la distribution de probabilité lorsque l'erreur de mesure suit une loi normale centrée et d'écart type égale à 1. On notera la présence de valeurs négatives, ce qui s'explique puisque cette erreur sur la coordonnée peut être négative ou positive.

L'arrêté sur les classes de précision ne vise pas à contrôler les écarts sur chacune des coordonnées. On raisonne donc sur les écarts en distance (euclidienne) entre la position des points à

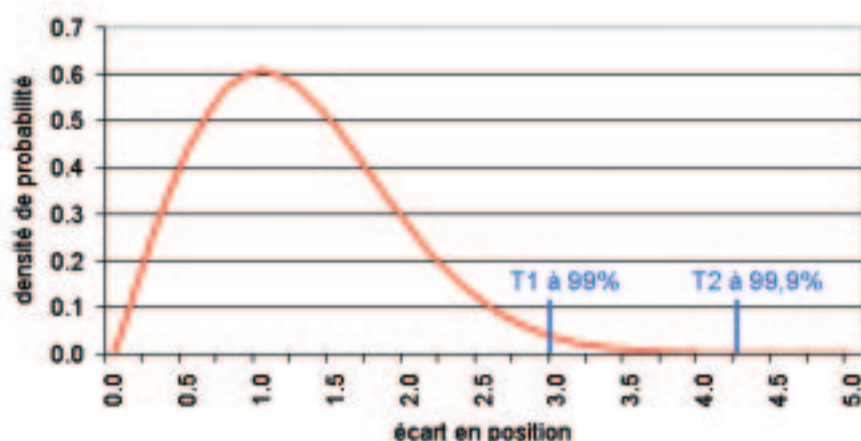


Figure 4 : Densité de probabilité d'une variable aléatoire représentant l'écart en position sur la mesure d'un point lorsque l'on considère que l'erreur commise sur chaque coordonnée suit une loi normale centrée, d'écart type égal à 1 cm.

contrôler et leur position théorique parfaite. Si l'on se place en 2 dimensions, l'écart en position sur un point est donc égal à $e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$

où e_x et e_y sont respectivement les erreurs sur les coordonnées x et y pour ce point. On constate que ces écarts ne peuvent être que positifs ou nuls, contrairement aux erreurs sur chacune des coordonnées. Ces écarts en position, sont représentés par une nouvelle variable aléatoire construite à partir des variables aléatoire représentant chacune des deux coordonnées, et supposées suivre rigoureusement la même loi. La figure 4 illustre l'exemple la distribution de probabilité de cette nouvelle variable aléatoire représentant l'erreur en position.

L'erreur en position moyenne est dans ce cas égale à 1,25 cm.

En pratique, lorsque l'on effectue un contrôle, on ne mesure pas chaque erreur en position de manière parfaite puisque l'on y additionne une nouvelle erreur provenant de l'imprécision des mesures de contrôle. L'arrêté introduit un coefficient de sécurité (au minimum égal à 2) limitant ce fait. Ainsi, dans le cas ci-dessus, avec un facteur de sécurité choisi égal à 2, cela correspondrait à une classe de précision de 1,11 cm.

On voit apparaître sur la Figure 4 un seuil T1 qui illustre le fait que 99 % des écarts en positions sont inférieurs à

3,03 cm. Ce seuil T1 doit être considéré comme un seuil de "vigilance" à partir duquel il faut identifier le nombre de points le dépassant afin de s'assurer que ce nombre est compatible avec l'hypothèse gaussienne.

Le seuil T2 à 99,9%, est selon l'arrêté, la limite supérieure acceptable. Aucun écart ne doit dépasser cette limite. Dans l'exemple T2 prend la valeur théorique de 4,28 cm. Selon l'arrêté, il vaudrait 4,54 cm.

Le seuil T2 peut paraître trop élevé puisqu'il permet de tolérer des écarts en position multiple de la classe de précision souhaitée (ici 4 fois supérieur). Le baisser de manière trop importante équivaldrait à s'écarter de l'idée que la faute est grossière et à rejeter le travail fourni par le prestataire alors même que ses travaux respectent le modèle gaussien. Par exemple, faire passer ce taux de rejet à 99 % au lieu de 99,9 % diminuerait la valeur de la borne T2 de 33 %, mais cette option reste discutable.

En ce qui concerne le seuil T1, le diminuer seul, reviendrait à déclencher notre vigilance plus tôt. A titre d'exemple, calculons la valeur du seuil pour déclencher notre vigilance à partir de 90 % au lieu de 99 %.

On sait (P. Sillard, 2003) qu'à deux dimensions la densité de probabilité de la variable aléatoire écart en position est donnée par la formule de Rayleigh suivante, où σ est l'écart type des

variables aléatoires gaussiennes correspondant à l'erreur sur chaque coordonnée :

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

Pour un niveau de confiance à 90 %, la borne T1 doit donc être fixée de telle manière que :

$$\int_0^{T1} f(x) dx = 0,90$$

Ce qui équivaut à

$$\int_0^{T1} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \left[-e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \right]_0^{T1} = 0,90$$

On sait d'autre part que l'espérance de cette loi de Rayleigh vaut

$$E[X] = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \text{ on obtient donc :}$$

$$T1 = \sqrt{-\frac{4}{\pi} \ln(0,10)} E[X]$$

On remarquera que

$$\sqrt{-\frac{4}{\pi} \ln(0,10)}$$

représente le "k" à deux dimensions que l'on trouve dans l'arrêté, mais pour un niveau de confiance fixé à 90 %.

Appliqué à notre exemple, l'écart moyen en position valant 1,25 cm on obtiendrait une valeur de seuil égale à 2,14 cm au lieu de 3,03 cm, soit 30 % plus basse. Le nombre de point toléré au-delà de T1 serait alors évidemment plus important, à moins de diminuer en parallèle de seuil T2. La figure 5 ci-dessous illustre le nombre de points tolérés au-delà de T1 fixé à un niveau de confiance de 90% et 99% avec T2 à 99,9 %. On y trouve aussi la courbe du nombre de points tolérés pour T1 fixé à 90 % de confiance et T2 ramené à 99 %. Dans le cas d'un contrôle portant sur 15 points, selon les règles actuelles de l'arrêté, le nombre maximum de points dépassant T1 est de 2, T1 valant pour notre exemple 3,03 cm. Si T1 correspondait à un seuil à 90 % sans bouger T2, ce nombre maximum serait également de 2 points ne devant pas dépasser 2,14 cm. Pour un contrôle portant sur un

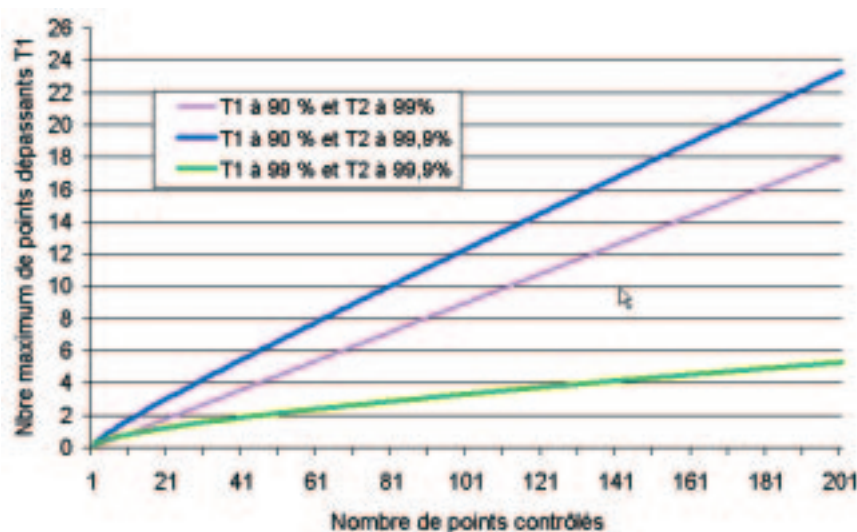


Figure 5 : Courbes représentatives du nombre maximum de points ne devant pas dépasser le seuil T1 lorsque celui-ci est fixé à un niveau de confiance égal à 99 % ou 90 % pour T2 fixé à 99,9 % ou 99 %.

coûteux de procéder à des contrôles, en respectant un facteur de sécurité de 2 au minimum. La possibilité d'utiliser un coefficient de sécurité plus faible (tout en restant supérieur ou égal à 1), si cela restait théoriquement correct, faciliterait alors grandement le contrôle dans ces cas difficiles.

La Table 3 ci-contre présente l'impact de l'utilisation du majorant du facteur de dilatation (P. Sillard, 2003) dû aux erreurs de mesures de contrôle, au lieu de sa véritable valeur. On s'aperçoit que l'impact est vraiment négligeable, sauf dans le cas où l'on pourrait utiliser un coefficient de sécurité égal à 1 : le vrai facteur de dilatation ferait baisser de 6 % la valeur de l'écart moyen en position et d'autant, par voie de conséquence, les seuils T1 et T2.

Application de l'arrêt à des points de canevas

On peut identifier deux cas de figure en ce qui concerne l'application de l'arrêt sur les classes de précision au canevas.

■ Etablissement de canevas de précision décimétrique ou inférieure

Il s'agit typiquement de travaux à des échelles cadastrales ou à des précisions suffisantes pour des chantiers topographiques liés par exemple à de l'orthophotographie ou à des réseaux de distribution ou d'assainissement.

Prenons le cas de l'établissement d'un canevas de précision 15 cm.

L'utilisation du gabarit standard semble

■ ■ ■ nombre limité de points, déplacer la valeur de T1 peut donc avoir un effet intéressant, sans aucunement remettre en cause le concept théorique sous-jacent à l'arrêt.

Baisser également le seuil T2 contribue à réduire ce nombre maximum de points au-delà de T1 ; cela abaisse également le seuil de non-conformité de la prestation, ce qui reste conceptuellement discutable par rapport à l'hypothèse gaussienne.

D'ores et déjà, en utilisant la véritable valeur du "k" correspondant au seuil T2 on peut baisser la valeur de ce seuil d'environ 6 % en 2 dimensions et d'environ 9 % en 3 dimensions. Cela n'est pas très important mais se révèle non négligeable : l'inconvénient est de complexifier très légèrement le calcul du seuil T2. Enfin on notera qu'en contrôlant uniquement de 1 à 4 points, le seuil T1 devient aussi le seuil de rejet en lieu et place du seuil T2.

■ Influence du coefficient de sécurité

Le coefficient de sécurité C a de multiples influences.

• Tout d'abord sur la valeur de l'écart moyen en position : plus le coefficient est bas (donc moins les mesures de contrôles sont précises) plus cette valeur moyenne augmente.

• Ensuite, mécaniquement, sur les seuils T1 et T2 : ceux-ci étant directement proportionnels à la valeur moyenne de l'écart moyen en position, il vont donc augmenter si C diminue.

Il faut bien comprendre que ces deux aspects ne sont aucunement gênants et il ne faut pas s'alarmer sur ces augmentations de valeurs, puisqu'elles ne reflètent que l'imprécision additionnelle due aux mesures de contrôle.

• Enfin sur la difficulté de mise en œuvre du contrôle dès lors que l'on s'approche de précisions centimétriques ou millimétriques.

Ce dernier point est d'importance dès lors que l'on effectue des travaux topographiques à très grande échelle ou de haute précision. Il peut devenir techniquement très difficile ou vraiment très

Coeff. de sécurité	Facteur de dilatation $\left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)^{\frac{1}{2}}$	Majorant facteur de dilatation $\left(1 + \frac{s^2}{2\sigma^2}\right)$	Diminution en % de l'écart moyen en position et de T1 et T2
1	1,414	1,500	6
2	1,118	1,125	1
3	1,054	1,056	0
4	1,031	1,031	0

Table 3 : influence de l'utilisation du véritable facteur de dilatation dû à l'imprécision des mesures de contrôle, au lieu de son majorant, sur l'écart moyen en position et sur les valeurs des seuils T1 et T2

parfaitement adaptée puisqu'elle conduit avec un facteur de sécurité égal à 2, à une erreur moyenne en position de 16,88 cm, et aux seuils $T1 = 40$ cm et $T2 = 60$ cm.

Le contrôle interne pourra se faire aisément par des moyens traditionnels ou bien par GPS en mode RTK.

On pourrait même inciter, vu la valeur de la précision et la parution du nouveau décret du 10 Mars 2006 (Décret 2006-272) sur l'obligation de rattachement, à se passer de précision interne et demander l'établissement du canevas directement dans le RGF93 : cela conduirait bien sûr à spécifier une précision totale. C'est de plus, tout à fait cohérent avec l'évolution des technologies actuelles de positionnement par satellite et l'exploitation des réseaux GPS temps réels comme notamment TERIA qui devrait couvrir l'ensemble du territoire métropolitain d'ici fin 2006. Sur des chantiers opérationnels en terme de capteurs GNSS, cela conduirait même à des gains en efficacité non négligeables. Le contrôle ne devrait pas être un problème car la précision de 7,5 cm est facilement atteignable, sans surcoût particulier.

Si les seuils $T1$ et $T2$ paraissaient trop importants au maître d'ouvrage, il est tout à fait possible dans cette gamme de précision, de baisser la précision demandée : en demandant 10 cm au lieu de 15 cm, l'erreur moyenne en position est ramenée à 11,25 cm, le seuil $T1$ à 27,23 cm et le seuil $T2$ à 40,84 cm. Cette nouvelle précision, toujours décimétrique ne change pas fondamentalement la physionomie du marché, ni son contrôle, en ce qui concerne les technologies et modes opératoires à mettre en œuvre, et les coûts afférents.

Pour ces précisions décimétriques, l'utilisation de gabarits d'erreurs spécifiques ne s'impose donc généralement pas.

■ Etablissement de canevas de précision centimétrique ou supérieure

Comme on l'a vu précédemment à travers l'exemple de polygonale de précision, ou à travers les simulations numériques effectuées, on peut rencontrer certaines difficultés lorsque l'on cherche

à appliquer l'arrêté à des travaux topographiques de précision.

Sur la spécification des résultats

Les valeurs de seuils, si l'on utilise le gabarit standard, peuvent apparaître comme étant trop "lâches" par rapport aux écarts que l'on souhaite tolérer pour le chantier : cela sera d'autant plus vrai qu'il s'agira de travaux de précision pour lesquels strictement aucun écart ne doit être toléré au-delà d'une borne bien plus faible que la borne $T2$ du modèle standard.

Dans ce cas, actuellement deux solutions semblent se présenter :

- Conserver le modèle d'erreur standard, car l'on considère que les erreurs de mesures topographiques suivent habituellement une distribution gaussienne : avoir un seuil de rejet plus bas signifie donc que l'on souhaite en réalité une meilleure précision. Il suffit donc d'augmenter la précision demandée, ce qui fera baisser les seuils $T1$ et $T2$. Cette solution simple peut être difficile à appliquer à cause du coefficient de sécurité de 2 au minimum, qui va lui, compliquer grandement le contrôle dès lors que l'on va augmenter la précision.
- Etablir son propre gabarit : cette possibilité est offerte par l'arrêté. Elle peut effectivement résoudre tous les problèmes liés aux seuils que l'on rencontre avec le modèle standard pour

nos travaux de précision. Déterminer son propre modèle revient à considérer que les erreurs de mesures ne suivent pas une loi normale, et permet donc de modéliser cette nouvelle loi. Ou bien, cela revient à imposer directement le respect de certaines contraintes en faisant cette fois abstraction de toute considération statistique. Cette option intéressante du gabarit spécifique doit donc être considérée avec grande précaution, afin de ne pas aboutir à des spécifications alléchantes "sur le papier", mais qui dans la réalisation concrète des travaux topographiques à réaliser, peut générer d'énormes contraintes.

Sur la réalisation du contrôle

Que l'on utilise un gabarit standard ou bien un gabarit spécifique, l'arrêté impose de respecter un coefficient de sécurité égal à 2 au minimum. Cette contrainte, va s'avérer de plus en plus difficile et coûteuse à mettre en œuvre lorsque la précision centimétrique demandée va augmenter.

Le contrôle peut aujourd'hui se faire de manière simple et rapide en utilisant par exemple le système GPS en temps réel qui offre des précisions de l'ordre de 2 ou 3 cm en planimétrie. Cependant, en respectant un coefficient de sécurité de 2 au minimum, cela ne pourra plus se faire de cette manière à partir d'une précision demandée supérieure à 4 centimètres environ. Avec



■ ■ ■ cette technologie de positionnement par satellite, il faudrait alors réaliser des observations statiques longues et répétées afin de garantir le respect d'une précision de contrôle de l'ordre du centimètre, tout en respectant "les règles de l'art". Ces contrôles, qui étaient simplement, facilement et systématiquement envisageables deviennent alors beaucoup plus délicats à mettre en œuvre, grands consommateurs de temps de travail, et donc très coûteux. De ce fait, cela conduira probablement à ne contrôler qu'un nombre très réduit de points, ou ne favorisera pas l'application systématique de la procédure de contrôle.

Dans certains cas le contrôle peut s'avérer simplement irréalisable : il est par exemple tout à fait possible d'obtenir une précision totale d'environ 2 cm en utilisant le Réseau GPS Permanent RGP. Par contre réaliser le contrôle de cette précision totale s'avère quasiment impossible.

On rencontrera également de grosses difficultés sur les précisions internes, où la difficulté et le temps passé pour ne

contrôler que quelques points risquera de coûter fort cher.

On remarquera que la circulaire relative à la mise en œuvre de l'arrêté indique que *"la précision des mesures de contrôle sera déduite des règles de l'art et des connaissances généralement admises par les professionnels"*. Nul doute que ces "règles de l'art" risqueront parfois d'être remises en cause lorsque la procédure de contrôle rejettera une prestation. Et cela d'autant plus que la précision demandée sera grande. Qui sera alors le garant de ces "règles de l'art" ?

Cependant, il semble effectivement difficile dans un arrêté ou une circulaire, de préconiser simplement, de meilleure manière, la bonne qualité des mesures de contrôle qui doivent être réalisées. Enfin, le novice qui cherchera à appliquer l'arrêté, se posera également la question de la taille de l'échantillon de contrôle qu'il devrait choisir en fonction du nombre de points demandés. La circulaire fournit quelques exemples de contrôles, mais ne donne pas de réelle indication ou conseil sur ce sujet.

Cela semble donc indiquer que lorsque des objets sont levés par rapport à un canevas au sol, rattaché au RGF93, on ne pourrait pas effectuer le contrôle directement par GPS temps réel, mais qu'il faudrait se remettre en station sur le canevas afin de procéder aux mesures nécessaires à l'établissement des écarts. Cela serait consommateur de temps si l'on souhaite réaliser quelques contrôles répartis sur l'étendue de la polygonale. Faudrait-il appliquer une procédure comparable à la procédure de contrôle interne d'un canevas (meilleure translation et rotation) pour déterminer les écarts ? Qu'en est-il lorsqu'un levé est réalisé de manière mixte, au tachéomètre et au GPS ? Ou bien, doit-on considérer que le RGF93 est le canevas de référence ?

De la même manière que pour les points de canevas, nous allons être confrontés au problème de la difficulté du contrôle dès lors que la précision demandée va augmenter.

Enfin il faudra bien s'assurer de la bonne formulation de la spécification de résultat, en identifiant clairement le canevas qui servira de référence...au contrôle.

Le groupe de travail Obligation de Rattachement du CNIG est actuellement chargé :

- d'organiser toutes les mesures d'accompagnement pour une meilleure application du décret instituant le RGF 93 comme étant le système géodésique national et le Lambert 93 ainsi que les coniques conformes 9 zones, les projections qui lui sont désormais associées.
- d'examiner les conditions d'application de l'arrêté sur les classes de précision et de faire les propositions nécessaires pour le faire évoluer si besoin.

Le groupe de travail présidé par l'Association des Ingénieurs Territoriaux de France comprend notamment les représentants de : CNIG, AITF, IGN, DGI, OGE, CERTU, EDF et les 4 écoles ESGT, ENSG, ESTP, INSA Strasbourg.

Application de l'arrêté à des objets géographiques

L'arrêté précise que *"Les classes de précision de levés d'objets géographiques sont relatives aux canevas qui leurs servent de référence, et s'analysent selon 2 critères indépendants : classe de précision planimétrique par rapport au canevas, classe de précision altimétrique par rapport au canevas selon les critères de l'article 2"*.

Dans le cas de levés d'objets géographiques, la notion de précision interne ou de précision totale disparaît donc au profit d'une simple classe de précision. Comme il s'agit d'une précision "relative" au canevas qui lui sert de référence, le contrôle ne peut donc s'effectuer qu'à partir de ce même canevas qui lui sert de référence, en examinant selon un gabarit standard ou spécifique, les écarts entre les coordonnées des objets et celles issues des mesures de contrôle.

La démarche de la Ville de Nice

Dans le cadre de son nouveau marché de levés topographiques, des spécifications précises ont été formulées visant à allier les contraintes de précision relatives aux besoins et la bonne application de l'arrêté sur les classes de précision. Une rapide présentation des grandes lignes du cahier des charges concernant ces critères de précision est présentée ci-après.

Afin de simplifier au maximum les procédures de contrôle, et puisque cela correspondait également aux besoins, il n'a été fait usage que de précision totale dans le cadre de ce marché.

En ce qui concerne le rattachement au RGF93, la Ville de Nice a décidé de fournir systématiquement les stations encadrant le chantier afin de permettre au géomètre de se rattacher facilement

quel que soit l'environnement, urbain ou collinaire. De cette manière, la Ville de Nice reste entièrement maître de la position et de la qualité de son canevas principal, planimétrique et altimétrique en sus de la simplification du travail du prestataire (donc du coût), et favorise l'absence de difficultés ultérieures lors du contrôle, induites par le rattachement au RGF93. La classe de précision totale de ces points de canevas fournis est estimée à 2 cm aussi bien en planimétrie qu'en altimétrie.

Il est ensuite demandé au prestataire de réaliser sa polygonation en respectant une classe de précision totale de 2,5 cm : le géomètre est incité à utiliser les points de canevas fournis, ou bien, s'il le souhaite vraiment, il peut tout de même procéder lui-même aux mesures permettant le rattachement direct au RGF93.

Il est évident que le contrôle de cette précision totale ne peut pas se faire rapidement en respectant le coefficient de sécurité choisi égal à 2. Aussi, il pourrait être envisagé que les contrôles soient effectués par GPS temps réel, sur plusieurs séries de mesures moyennées. Cette rapidité dans le contrôle qui sera réalisé en régie, permettrait de vérifier systématiquement chaque chantier livré. Lorsque des problèmes seraient identifiés, alors un contrôle permettant d'assurer le coefficient de sécurité égal à 2 serait appliqué. De cette manière, on dérogerait "provisoirement" à l'arrêté en appliquant un premier contrôle appuyé sur un coefficient de sécurité égal à 1. On devancerait peut être une évolution future de l'arrêté et une nouvelle possibilité d'utiliser un coefficient supérieur ou égal à 1 pour ce type de travaux.

Il est d'ailleurs clairement précisé dans le marché, qu'il pourra être tenu compte de toute évolution ultérieure du décret sur les classes de précision ; cela concernerait bien évidemment la phase du contrôle dans le cas où une évolution future du décret viserait à faciliter son application pour des classes de précision centimétrique. Une étude complète de tous les objets géographiques référencés dans notre base de données topographiques a été

Famille	Objets	Symbole	spécification précision (Plani.Alti)
Assainissement	Avaloir		5.3
	Grille 35/70		2.2
	Buse axe		5.5
	Seuil		15.3
Bâtiment	Bassin		3.5
	Devanture		3.2
	Dur		3.2
Eclairage	Lampadaire double		5.5
	Lampadaire décoratif		5.5
EDF	Poteau		5.5
	Pylône		20.20
Télécom	Cabine triple		5.3
	Cabine simple hexagonale		5.3
	Cabine ouverte		5.3
Limites	Clôture légère		5.5
	Glissière de sécurité		10.10
	Mur		2.2
Mobilier urbain	Grille de ventilation		3.3
	Horodateur		3.3
	Jardinière hexagonale VDN		5.5
Plage	Point douche		10.10
	Poubelle temporaire		15.10
	Dalle béton		5.5
	Espace sportif sable		15.10
Talus	Haut de talus		15.10
	Pied de talus		15.10
	Limite d'enrochement		30.30
Végétation	Fruitier		20.20
	Olivier		20.20
	Palmier		20.20
Voirie	Corde molle		5.5
	Limite goudron		10.5
	Trottoir		3.3

Table 3 : Extrait de la nomenclature d'objets topographiques de la Ville de Nice, présentant pour chaque objet la classe de précision à respecter.

menée. L'étude des besoins et des mesures répétées sur le terrain pour chaque type d'objet ont permis d'établir de manière réaliste les classes de précision demandées pour chacun d'entre eux. On trouvera ci-dessous (table 4) à titre d'illustration de la précision souhaitée ainsi que du positionnement des points de levés qui s'y rapportent, un échantillon de quelques uns des objets de notre bibliothèque pour plusieurs des familles qui la composent. Il a été demandé dans le cahier

des clauses techniques particulières de respecter les classes de précision de ces objets comme le permet l'arrêté.

Les contrôles de précision des objets géographiques, utiliseront le modèle standard. Ces mesures de contrôle pourraient également être réalisés par GPS temps réel.

Les procédures de contrôle aussi bien pour le canevas que pour les objets géographiques sont actuellement encore en phase d'établissement.

■ ■ ■ Enfin, il a été décidé que la taille de l'échantillon de contrôle n'excèdera pas 12 % des points de canevas et 12 % des objets géographiques levés : pour ces derniers, la composition de l'échantillons englobera des éléments représentatifs des diverses classes de précision attendues.

Conclusion

Ce témoignage ne constitue encore qu'une approche tâtonnante dans la compréhension et la mise en œuvre de l'arrêté sur les classes de précision. On a pu constater que ce dernier permet de réaliser un véritable contrôle quantifié de la qualité des prestations topographiques. La valeur ajoutée est forte car ce travail de contrôle n'avait habituellement jamais pu être systématisé et réalisé avec autant de rigueur pour recetter les commandes topographiques réalisées par l'État, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte.

L'expérience laisse à penser que l'arrêté semble particulièrement bien adapté à tous les travaux topographiques de précision décimétrique ou de précision inférieure. Il paraît cependant un peu plus délicat à mettre en œuvre dès lors que l'on est concerné par des précisions plus importantes. Après cette période suffisamment longue d'existence de cette nouvelle réglementation nous adhérons pleinement à la démarche du CNIG de recueillir à travers les expériences de chacun, les aspects qui freinent ou compliquent son utilisation. D'ores et déjà le problème de la valeur minimale du coefficient de sécurité paraît être un des points qu'il conviendra d'analyser avec attention.

Certaines clarifications ou explications complémentaires pourraient aussi être apportées au texte, à travers une série d'articles à paraître, ou une sorte de guide d'application. Un recueil d'exemples ou de marchés type, pourrait également aider ceux qui découvrent ces règles, à établir de nouveaux marchés publics. Pour finir, on ne peut qu'inciter à l'application de cet arrêté

qui change effectivement de manière radicale la façon d'aborder la commande et son contrôle, et veiller à rester attentif aux futures conclusions du groupe de travail du CNIG sur ce sujet. ●

Remerciements

Je remercie monsieur Patrick Sillard pour ses explications et la grande disponibilité dont il a fait preuve à mon égard. J'adresse toute ma sympathie à messieurs Denis Delerba et Alain Harmel pour nos fructueuses discussions animées sur le sujet. Je remercie amicalement monsieur Michel Kasser pour le temps qu'il m'a consacré, ses conseils et son soutien personnel. Enfin je remercie sincèrement monsieur Jean-Pierre Maillard pour ses corrections et sa patience, monsieur Bernard Laugier et ses équipes, ainsi que monsieur Emmanuel Protte de la Direction de la Communication de la Ville de Nice.

Références

- ANDRES L., 2003**, *Transformation dans le Système R.G.F 93 de la base de données géographiques de la Ville de Nice*, Revue XYZ, N°97 - 4^e trimestre 2003.
- ARRETE DU 21 JANVIER 1980** *Fixant les tolérances applicable aux levés à grande échelle entrepris par les services publics*, Journal Officiel 19 Mars 1980.
- DELERBA D. - ANDRES L., 2003**, *Ville de Nice : un nouveau langage commun pour les marchés publics*, Géomètre n°12 - Décembre 2003.
- DECRET N° 2000-1276, 26 Décembre 2000**, *Décret portant application de l'article 89 de la loi n° 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics*.
- DECRET N° 2006-272, 10 Mars 2006**, *Décret modifiant le décret no 2000-1276 du 26 décembre 2000 portant application de l'article 89 de la loi no 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire relatif aux conditions d'exécution*

et de publication des levés de plans entrepris par les services publics.

KASSER M., 2003, *Les nouveaux textes réglementaires français en matière de précision des levés*, Revue XYZ, N° 96 - 3^e trimestre 2003.

SILLARD, P., 2003, *Arrêté sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques : quelques aspects statistiques*, Revue XYZ, N° 96 - 3^e trimestre 2003.

Contact

Ludovic ANDRES

Mairie de Nice

Responsable du Service Topographie et

Alignements

DCSIT - Direction Information

Géographique

Membre du GT SIG Topo de l'AITF

ludovic.andres@ville-nice.fr

ABSTRACT

Three years ago a new regulation defining survey classes for land surveys was published and replaced the former existing rules. Therefore, it is now time, and it is necessary, to examine how these new standards are used, what are the difficulties that are encountered, and what could be done in order to improve these survey class specifications. A working group of the french national council of geographic information (CNIG) is at the moment carrying out this synthesis and analysis. Meanwhile, the city of Nice presents here its first experience in applying this new regulation : this article points out the advantages that have been found, but also, the questions and problems that have been faced up. Finally, extensive use of these new rules is nevertheless encouraged and the reader is asked to look after the publication of the future results of the CNIG working group studying on that topic.

Choix optimal d'un modèle analytique de covariance pour la validation des mesures gravimétriques par la méthode de Collocation (Application : Nord de l'Algérie)

■ BENAHMED DAHO S. A. - SAHEL C. - ZEGGAI A.

La validation des données est une procédure extrêmement stricte qui garantit la qualité et l'intégrité de la banque de données gravimétriques. Elle est appliquée systématiquement, avant intégration dans la banque, à tout ensemble de données. Son principe consiste à faire une comparaison entre les valeurs observées et prédites, estimées par une technique puissante telle que la méthode de la Collocation. Cependant, la difficulté majeure dans son application réside dans la détermination de sa fonction de covariance empirique et par conséquent, la sélection de sa représentation analytique correspondante capable de décrire le comportement local du champ de gravité. Ainsi, l'objectif principal de cet article est de proposer une procédure pour la sélection du modèle analytique approprié de covariance à des fins de validation. Plusieurs fonctions locales analytiques de covariance couramment utilisées en géodésie physique ont été testées en vue de sélectionner dans la zone test, à partir d'une procédure statistique, le modèle adéquat. Pour ce but, les données de gravité fournies par le B.G.I. composées de 2041 mesures de gravité couvrant la partie nord de l'Algérie entre les limites $[34^\circ, 37^\circ]$ en latitude et $[-2^\circ, 8^\circ]$ en longitude, ainsi que le modèle géopotential optimal OSU91A développé jusqu'au degré et ordre 360, ont été utilisés pour tester la méthodologie conçue. La validation a été appliquée aux anomalies à l'air libre réduites de l'effet du modèle géopotential de référence OSU91A. Le taux d'erreur détecté en utilisant cette technique représente 2.16% qui reste insignifiant relativement au nombre de mesures utilisées et prouve que les mesures de gravité fournies par le B.G.I. sont de bonne qualité et peuvent être employées en conséquence dans le calcul du géoïde Algérien. En outre, ce travail montre l'inhomogénéité des données de gravité dans la zone expérimentale et l'insuffisance de leur précision.

■ mots-clés

Collocation, Modèle global de potentiel, procédure de validation.

Les problèmes de géodésie physique relatifs à la détermination par voie gravimétrique de la forme réelle de la terre sont formulés et résolus en termes d'intégrales étendues sur la terre entière. Ceci requiert la connaissance d'une manière continue la valeur de la pesanteur en tout point de la surface de la terre. En pratique, on mesure la pesanteur en quelques points seulement, donc il va falloir prédire la valeur de la pesanteur aux points autres que les points de mesure par le moyen d'interpolation et/ou d'extrapolation en utilisant une technique puissante telle que la Collocation par les moindres carrés.

Cette méthode à caractère statistique est considérée comme la seule technique capable de fournir, en plus de la valeur de prédiction, l'erreur sur cette estimation qui constitue une information capitale pour procéder à une analyse fiable et rigoureuse des résultats de prédiction obtenus.

Cependant et face à cet avantage, le problème crucial dans l'application de cette méthode demeure dans le calcul de sa fonction de covariance empirique et par conséquent, la sélection de sa représentation analytique correspondante. Cette fonction devrait être utilisée pour exprimer la dépendance statistique entre les quantités mesurées et celles à prédire qui peuvent être de même nature ou de nature différente.

L'objectif de cet article est de proposer une méthodologie et des procédures permettant de choisir, parmi les modèles de covariance existants, un modèle local de covariance optimum dans la zone expérimentale, de comparer les résultats de prédictions obtenus par divers modèles de covariance proposés dans la littérature afin de tester la sensibilité de la méthode de la collocation par les moindres carrés aux modèles utilisés, et enfin de valider l'ensemble des mesures gravimétriques utilisées dans

■ ■ ■

- ■ ■ cette étude. Dans ce contexte, les données de gravité fournies par le B.G.I. composées de 241 mesures couvrant la partie nord de l'Algérie ainsi que le modèle géopotentiel OSU91A ont été utilisés pour tester la méthodologie développée.

Enfin, il faut noter qu'aujourd'hui, le choix de ce modèle, comme les procédés d'ajustement des modèles aux données sont encore des problèmes scientifiques ouverts et nécessitent en revanche une attention particulière.

Méthode de Collocation

On rappelle, dans ce paragraphe, le principe de la collocation avec utilisation d'une fonction de covariance. Pour une description complète de cette méthode, nous conseillons aux lecteurs de consulter l'ouvrage de Moritz (1980).

La collocation est une méthode d'estimation optimale applicable notamment aux "signaux gravimétriques". L'estimation d'un signal scalaire $S(P)$ va devoir être effectuée à partir de :

- mesures I_i d'origines pouvant être diverses, effectuées en des points Q_i et tel que : $I_i = L_i s$ ($i = 1, \dots, q$)
 L_i est un opérateur linéaire pouvant comporter des dérivations par rapport aux coordonnées du point P.
 L'écriture matricielle est : $I = L \cdot s$
 Où L et I sont deux vecteurs de q composantes.
- une fonction de covariance du signal aléatoire S .

■ Collocation par les moindres carrés

La méthode de la collocation par moindres carrés ne nécessite pas la connaissance d'un modèle mathématique précis auquel S obéirait. Cette particularité est intéressante en gravimétrie où les perturbations ($\zeta, \eta, T, N, \Delta g, \dots$) dues aux accidents de relief sont considérées comme des quantités aléatoires.

La méconnaissance du modèle mathématique est palliée par une exploitation des propriétés statistiques de S . On considère à priori le signal S et les mesures I_i comme des grandeurs aléatoires de valeur moyenne nulle.

Soient : $I = (I_1, I_2, \dots, I_q)^T$ le vecteur des observations, et $S = (S_1, S_2, \dots, S_m)^T$ le vecteur des signaux, deux quantités aléatoires centrées.

On considère également, les matrices de covariance suivantes : $C_{II} = \text{Cov}(I, I) = E\{I I^T\}$: Matrice auto-covariance des observations, de dimension $q \times q$,

$C_{sI} = \text{Cov}(s, I) = E\{s I^T\}$: Matrice des covariances croisées entre I et s , de dimension $m \times q$

$C_{ss} = \text{Cov}(s, s) = E\{s s^T\}$: Matrice auto-covariance du signal, de dimension $m \times m$

Où $E\{\cdot\}$ représente l'espérance mathématique.

Le problème consiste à trouver la meilleure estimation \hat{s} du signal s sur la base des données disponibles sachant que la dépendance entre I et s n'est pas exprimée par un modèle fonctionnel, mais uniquement par le biais des matrices de variance-covariance.

Une estimation linéaire du vecteur s sera de la forme : $\hat{s} = H \cdot I$ (1)
 Où H est une matrice rectangulaire de dimension $m \times q$ à déter-

miner de manière à minimiser chacun des termes diagonaux de la matrice de covariance de l'erreur ($\varepsilon = \hat{s} - s$), telle que :

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = \text{Cov}(\varepsilon, \varepsilon) = E\{\varepsilon \varepsilon^T\} = E\{(\hat{s} - s)(\hat{s} - s)^T\}$$

Les termes diagonaux de cette matrice représentent les variances σ_k^2 de l'erreur, telle que :

$$\sigma_k^2 = E\{\varepsilon_k^2\} = E\{(\hat{s}_k - s_k)^2\}$$

L'expression du produit $\varepsilon \varepsilon^T$ est donnée par :

$$\varepsilon \varepsilon^T = (H \cdot I - s)(H \cdot I - s)^T = H \cdot I I^T \cdot H^T - s \cdot I^T \cdot H^T - H \cdot I s^T + s \cdot s^T,$$

dont l'espérance mathématique fournit la matrice de covariance de l'erreur :

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = E\{\varepsilon \varepsilon^T\} = H \cdot E\{I I^T\} \cdot H^T - H \cdot E\{s I^T\} + E\{s s^T\} \quad (2)$$

$$= H \cdot C_{II} \cdot H^T - C_{sI} \cdot H^T - H \cdot C_{sI} + C_{ss} \quad (3)$$

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = C_{ss} - C_{sI} \cdot C_{II}^{-1} \cdot C_{Is} + (H - C_{sI} \cdot C_{II}^{-1}) \cdot C_{II} \cdot (H - C_{sI} \cdot C_{II}^{-1})^T$$

ceci depuis la relation :

$$C_{Is} = C_{sI}^T = E\{s I^T\}$$

L'expression (3) est constituée d'une partie constante A et une partie B qui dépend de H telles que :

$$A = C_{ss} - C_{sI} \cdot C_{II}^{-1} \cdot C_{Is}$$

$$B = (H - C_{sI} \cdot C_{II}^{-1}) \cdot C_{II} \cdot (H - C_{sI} \cdot C_{II}^{-1})^T$$

La matrice B est définie positive et par conséquent ses termes diagonaux sont toujours positifs. Pour que la variance de l'erreur de la matrice $C_{\varepsilon\varepsilon}$ soit minimale, il faut choisir $B=0$, et on aura : $H = C_{sI} \cdot C_{II}^{-1}$

Sous ces conditions, l'estimation optimale de s est donnée par la formule :

$$\hat{s} = H \cdot I = C_{sI} \cdot C_{II}^{-1} \cdot I \quad (4)$$

et sa matrice de covariance se réduit à :

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = C_{ss} - C_{sI} \cdot C_{II}^{-1} \cdot C_{Is} \quad (5)$$

■ Prédiction des anomalies de gravité

Le problème d'interpolation ou d'extrapolation par les moindres carrés des anomalies de gravité (Heiskanen and Moritz, 1967, sec. 7-6) peut être considéré comme une application de la présente méthode de prédiction. En effet, si on désigne par $I = (\Delta g_1, \Delta g_2, \dots, \Delta g_n)^T$ le vecteur des anomalies de gravité aux points d'observation p_i , et par $S = \tilde{\Delta g}_p$ la valeur prédite d'anomalie de gravité au point P , alors les équations (4) et (5) deviennent :

$$\tilde{\Delta g}_p = (C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}) \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{12} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta g_1 \\ \Delta g_2 \\ \vdots \\ \Delta g_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

et

$$C_{\varepsilon p \varepsilon p} = C_0 - (C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}) \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{12} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} C_{p1} \\ C_{p2} \\ \vdots \\ C_{pn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

avec ε_p désigne l'erreur de prédiction, $C_{ij} = C(\Delta g_i, \Delta g_j) = C(d_{ij})$, $C_{pi} = C(\Delta g_p, \Delta g_i) = C(d_{pi})$, et $C_0 = C(\Delta g_p, \Delta g_p) = C(0)$.

Les formules (6) et (7) sont identiques, aux notations près, aux équations établies dans le cas de la prédiction des anomalies de gravité par les moindres carrés (Heiskanen and Moritz, 1967, sec. 7-6).

Toutes les covariances C_{Pi} et C_{ij} sont obtenues à partir de la même fonction de covariance des anomalies de pesanteur $C(d)$ que nous supposons qu'elle est isotrope et qu'elle dépend uniquement de la distance horizontale entre les points considérés.

Procédure de calcul

La méthodologie générale adoptée, dans le cadre de ce travail, pour le choix optimal d'un modèle analytique de covariance à des fins de validation, est décrite par les étapes successives suivantes :

- Calcul de la fonction de covariance empirique et son ajustement sur les modèles analytiques locaux de covariance,
- validation de l'ensemble des mesures gravimétriques de la zone expérimentale.

A cet effet, un programme en langage Fortran a été élaboré à la Division de Géodésie du Centre National des Techniques Spatiales. Il permet de calculer la fonction de covariance empirique, de sélectionner sa représentation analytique correspondante et ceci par ajustement des valeurs empiriques de covariance sur les modèles locaux existants, et d'effectuer une interpolation ponctuelle et de générer une grille régulière.

■ Description des différents modules du programme

Le programme principal comporte trois modules essentiels décrits ci-dessous qui font appel à d'autres sous-routines nécessaires pour l'organisation et le traitement des données.

COVAR_EMPIRIQUE : Ce module permet le calcul de la fonction de covariance empirique, et ses deux paramètres empiriques essentiels à savoir, la variance C_0 et la distance de corrélation ζ .

Paramètres d'entrée : (Pas d'échantillonnage, Nombres d'intervalles, fichier de données)

Paramètres de sortie : (variance C_0 , distance de corrélation ζ et le vecteur des covariances)

ADJUST : Ce programme est établi pour ajuster la fonction de covariance empirique sur les modèles analytiques de covariance en utilisant la méthode itérative des moindres carrés où la solution approchée n'est autre que les paramètres empiriques C_0 et ζ .

Paramètres d'entrée : (C_0 et ζ empiriques, vecteur des covariances empiriques et option de covariance avec ou sans pondération)

Paramètres de sortie : (valeurs ajustées des paramètres (C_0 , ζ), vecteur des covariances analytiques pour chaque modèle).

PREDICTION : Le module de prédiction inséré dans le programme est une partie extraite du programme GEOGRID du logiciel GRAVSOFT (Tscherning et al., 1992) largement éprouvé et validé par l'IGeS (International Geoid Service, D.I.I.A.R. - Politecnico di milano), et qui a été modifiée et adaptée pour le besoin de cette étude.

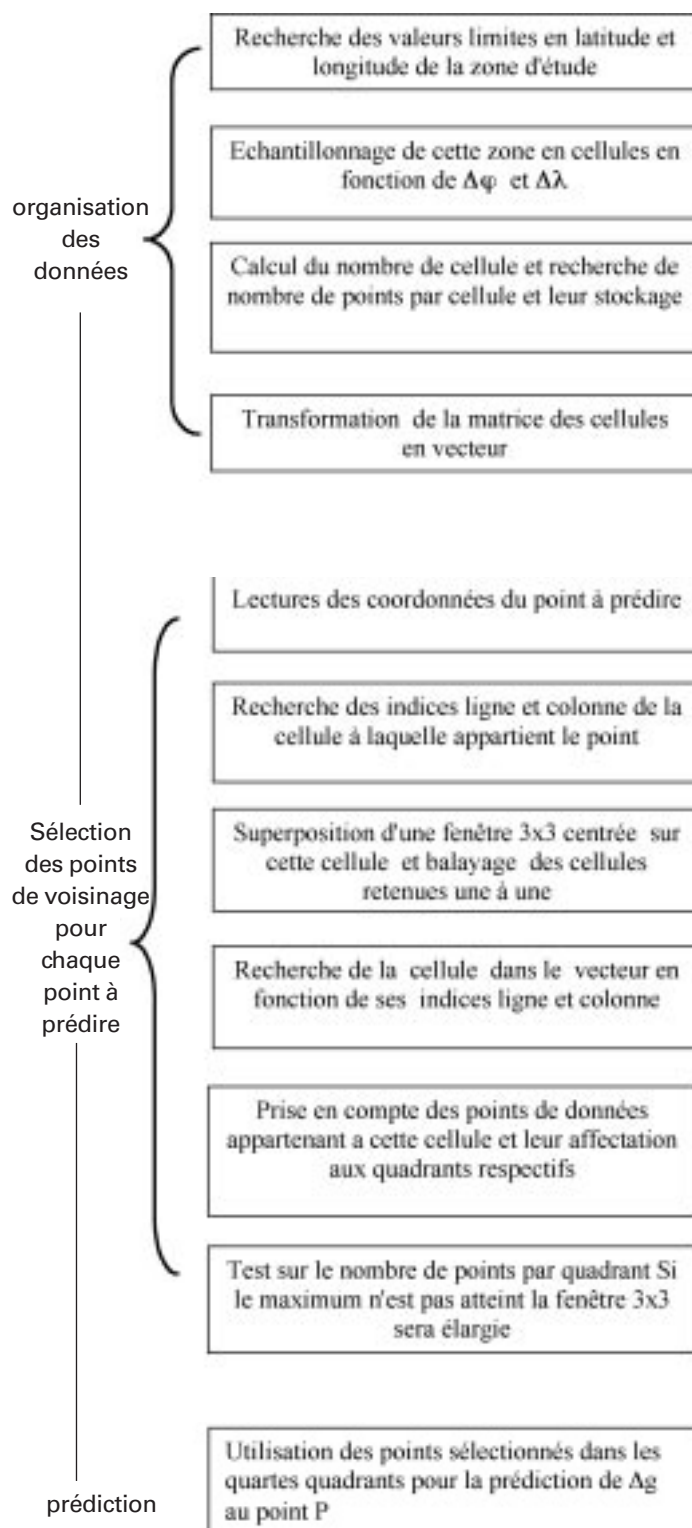


Figure 1 : Organisation et structuration des données.

- ■ ■ **Paramètres d'entrée** : fichier de données, rang de la donnée à prédire, nombre de point par quadrant, distance de corrélation en km, précision de la mesure, prédiction (grille ou ponctuelle), fichier des points de prédiction, modèle approprié de covariance

Paramètres de sortie : fichier des prédictions

Deux types de prédiction sont possibles :

- **Prédiction ponctuelle** : Elle peut être utilisée soit pour estimer la valeur de la mesure aux points autres que les points d'observation, soit pour prédire sa valeur en des points où la mesure est déjà faite pour procéder à sa validation. Cependant, et étant donné que cette prédiction dépend uniquement du voisinage immédiat, il est donc indispensable que tous les points à prédire doivent être inclus dans la zone d'étude.

A cet effet, le module PREDICTION commence par la vérification de l'appartenance de la zone de calcul à celle des données en se basant sur les valeurs limites de la zone. Dans le cas contraire un filtrage est effectué pour ne retenir que les points inclus. La figure 1 illustre l'organigramme général de la gestion et l'organisation des données utilisées dans le module PREDICTION.

- Organisation des données

En fonction de ses valeurs limites en latitude et longitude, la zone de données est organisée en cellules de dimensions $d\varphi$, $d\lambda$ telles que :

$$d\varphi = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{N_{\varphi}} \text{ et } d\lambda = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{N_{\lambda}}$$

Où N_{φ} et N_{λ} représentent respectivement le nombre de lignes et de colonnes, et qui se calculent par les formules suivantes :

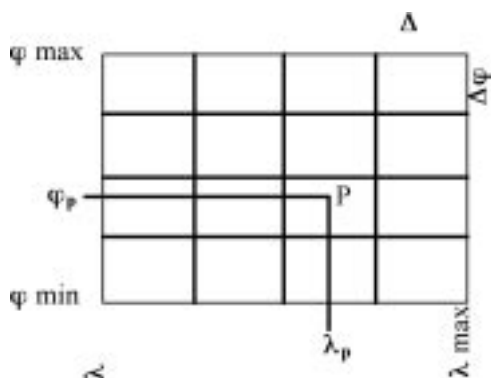
$$N_{\varphi} = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{r} \text{ et } N_{\lambda} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{r}$$

$$\text{avec } r = \sqrt{\frac{(\varphi_{\max} - \varphi_{\min})(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{np}}$$

np n'est autre que le nombre total des points retenus.

En fonction de ces éléments, le module transforme la matrice des cellules en vecteur et détermine le nombre de points par cellule.

- **Calcul des indices ligne colonne de la cellule qui contient le point P**



$$I = \text{int}\left(\frac{\varphi_P - \varphi_{\min}}{\Delta\varphi}\right) \text{ et } J = \text{int}\left(\frac{\lambda_P - \lambda_{\min}}{\Delta\lambda}\right)$$

- **Calcul du rang de la cellule dans le vecteur**

$$\text{RVECT} = I \cdot N_{\lambda} + J + 1$$

- sélection

En fonction de la position du point à interpoler, le nombre maximum de points par quadrant et la distance maximale, le programme procède à la sélection des points de son voisinage qui interviennent dans la prédiction.

La recherche des points se fait par un balayage de la grille par une fenêtre de 3 x 3. En cas d'insuffisance du nombre de points par quadrant et quand la distance le permet, cette fenêtre sera élargie en conséquence. L'affectation d'un point à un quadrant est basée sur les signes de $\Delta\varphi$ et $\Delta\lambda$.

$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	quadrant
+	+	I
-	+	II
-	-	III
+	-	IV

- **Génération de grille** : En plus de la prédiction ponctuelle, le programme permet la génération d'une grille régulière à partir des mesures ponctuelles dont les pas et les limites en latitude et en longitude sont laissés au choix de l'utilisateur. La prédiction aux nœuds de la grille s'effectue par la même procédure et les mêmes critères que la prédiction ponctuelle.

Tests numériques

■ Données utilisées

Présentation de la zone d'étude

La zone choisie pour notre application comporte 2041 points, située au nord de l'Algérie elle s'étend de [34° à 37°] en latitude et de [-2° à 8°] en longitude. Ce choix est conditionné par la densité relativement élevée des mesures. Les données de gravité contenues dans cette zone, dont la précision a priori est de 5 mGals et rattachées au Système de Référence Géodésique GRS67, ont été fournies par le Bureau Gravimétrique International (B.G.I.).

Toutes ces mesures ont été transformées du système GRS67 au système GRS80. Enfin, on a appliqué une correction atmosphérique recommandée par l'Association Internationale de Géodésie afin d'éliminer l'influence des masses atmosphériques. La répartition géographique de ces mesures est représentée sur la figure 2.

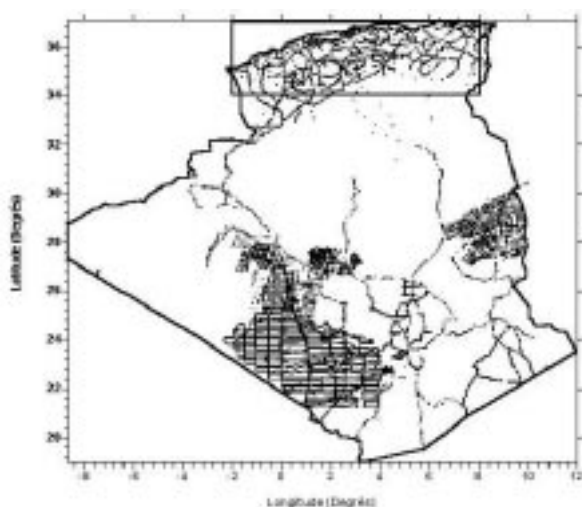


Figure 2 : Répartition géographique des mesures sélectionnées.

Modèle géopotential

La collocation est en général appliquée localement, et on traite alors des quantités résiduelles (observations et signal) par rapport à une représentation en harmoniques sphériques du potentiel disponible jusqu'à un degré et ordre donnés. Dans le contexte de ce travail, le modèle géopotential global OSU91A (Rapp et al., 1991), développé jusqu'au degré et ordre 360, a été utilisé pour réduire les anomalies de gravité observées de leurs contributions des grandes longueurs d'ondes calculées dans l'approximation sphérique par la formule suivante :

$$\Delta g = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} (n-1) \sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm} \cdot \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \cdot \sin m\lambda] \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (8)$$

Où θ, λ sont les coordonnées sphériques du point de calcul, $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ sont les coefficients normalisés du modèle géopotential du potentiel perturbateur, \bar{P}_{nm} sont les fonctions associées normalisées de Legendre et \bar{N}_{max} désigne le degré maximum du modèle géopotential utilisé.

Les anomalies réduites Δg_{red} sont obtenues en retirant les anomalies de gravité du modèle géopotential Δg_m calculées par (8) à partir des anomalies de gravité observées Δg_{obs} :

$$\Delta g_{red} = \Delta g_{obs} - \Delta g_m \quad (9)$$

Ces anomalies reflètent les caractéristiques locales de la zone en question puisque les contributions des grandes longueurs d'onde sont éliminées. Les statistiques, en mGals, des données observées et réduites sont résumées dans la table 1. Après l'opération de retrait, on obtient des anomalies réduites beaucoup plus lisses que les anomalies gravimétriques observées. La déviation standard des données se réduit de 29.767 mGals à 23.243 mGals et leur moyenne passe de 27.894 mGals à 0.358 mGals.

Anomalies	Min.	Max.	Moyenne	Sd
Δg_{obs}	-82.59	136.20	27.894	29.767
Δg_{red}	-67.75	123.46	0.359	23.243

Tableau 1 : Statistiques, en mGals, des anomalies réduites.

Traitements et résultats

Fonction de covariance empirique

La fonction de covariance empirique de l'anomalie réduite a été calculée avec le programme COVAR_EMPIRIQUE en utilisant la formule suivante :

$$C_{ee}(\psi) = \frac{1}{N} \sum \delta \Delta g_i \cdot \delta \Delta g_j$$

La somme est effectuée pour toutes les combinaisons des points Q_i et Q_j dont la distance ψ_{ij} est comprise entre $(\psi - \Delta\psi/2)$ et $(\psi + \Delta\psi/2)$. N est le nombre de combinaisons et $\Delta\psi$ représente la dimension de l'intervalle d'échantillonnage prise égale à 5' dans notre cas. Le choix de cette valeur dépend du pas de la grille à utiliser.

Fonction de covariance analytique

Après avoir calculer la fonction de covariance empirique, il va falloir trouver une expression de la fonction analytique de covariance dont la courbe des valeurs épouse le mieux possible celle des valeurs empiriques correspondantes avec le minimum d'écarts. Dans ce travail, nous avons testé cinq modèles analytiques isotropes de covariance généralement utilisés en géodésie physique dans le but de sélectionner le modèle de covariance approprié capable de décrire le comportement local du champ de gravité. Il s'agit des modèles de : Hirvonen, Gauss-Markov, Exponentiel, Cosinus et Triangulaire.

Le problème d'ajustement consiste donc à estimer les valeurs du vecteur des paramètres composé de la variance des anomalies réduites (C_0) et de la distance de corrélation (ξ) afin de se rapprocher le plus possible des valeurs empiriques. Une procédure itérative par moindres carrés (Algorithme de Gauss-Newton) est utilisée pour l'estimation de ces derniers, en prenant comme solution approchée les paramètres empiriques. Les résultats de l'ajustement de la fonction de covariance empirique sur les différents modèles ont été obtenus par le programme ADJUST. Les fonctions de covariance empirique et analytique de chaque modèle sont illustrées par la figure 3.

La comparaison des valeurs des erreurs moyennes quadratiques des résidus (EMQ), l'analyse des ces représentations graphiques et la comparaison des valeurs ajustées des paramètres \bar{C}_0 et ξ des différents modèles avec celles des paramètres empiriques, montrent que le modèle Exponentiel est optimum dans la zone expérimentale. L'accord entre les deux courbes est parfait jusqu'à une distance sphérique de 0°.30 (~ 30 km). Cependant, il faut noter que ces résultats restent proches de ceux obtenus par le modèle analytique de covariance de Gauss-Markov, et par conséquent, plusieurs tests sont indispensables pour les départager et de se prononcer, ainsi, sur le modèle adéquat.

En outre, et compte tenu des valeurs analytiques fournies par les modèles Cosinus et triangulaire qui sont loin d'être représentatives de la covariance empirique, on a décidé de rejeter ces modèles pour la suite des traitements de prédiction.

Modèle	\bar{C}_0 (mGal**2)	ζ (Degrés)	EMQ (mGal**2)
Hirvonen	591.0521	0.11630	26724.175
Gauss-Markov	586.2543	0.07723	12843.620
Exponentiel	557.1991	0.15044	8645.287
Cosinus	98.9413	0.17493	464467.670
Triangulaire	184.0560	0.67518	361338.865

Tableau 2 : Paramètres analytiques des différents modèles.

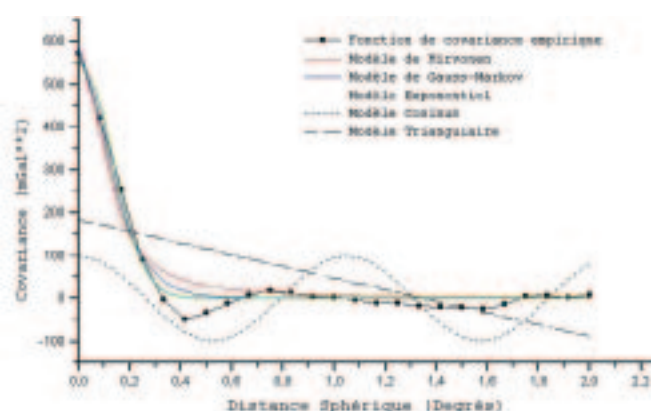


Figure 3 : Fonctions de covariance empirique et analytique des anomalies de gravité réduites.

Prédictions

Afin de se prononcer sur la méthodologie que nous avons adoptée pour le choix définitif du modèle approprié, deux tests ont été effectués et qui visent, d'une part, à valider le modèle choisi et à tester la sensibilité des résultats de prédictions obtenus aux différents modèles locaux de covariance, et d'autres part, à valider l'ensemble de données gravimétriques utilisées. Une première prédiction de l'ensemble des points de la zone d'étude est faite pour chaque modèle en utilisant ses paramètres ajustés. Les statistiques des écarts sont résumées dans la Table 3. Leur analyse montre que des forts pourcentages des écarts pour l'ensemble des modèles se trouvent situer dans l'intervalle $[-10 \text{ à } +10]$ mGals, et font ressortir le modèle de Gauss-Markov comme modèle approprié.

Les statistiques des différences entre le modèle approprié et les autres modèles sont regroupées dans la Table 4. Elles montrent que les résultats de prédictions obtenus ne sont pas trop sensibles aux modèles théoriques de covariance utilisés. On constate que plus de 92,1% des écarts sont compris dans l'intervalle $[-5 \text{ à } +5]$ mGals.

Delà on peut conclure que les tests effectués pour les divers modèles locaux de covariance $C(d)$ avec leurs paramètres ajustés

Modèles	Hirvonen	Gauss-Markov	Exponentiel
Minimum	-14.12	-18.51	-20.55
Maximum	12.73	7.47	20.78
Moyenne	0.031	0.035	-0.023
Déviat Standard	1.851	1.185	3.497
-5 ≤ écart ≤ 5	1997	2025	1774
Pourcentage	97.8	99.3	86.9
-10 ≤ écart < 10	2034	2038	1999
Pourcentage	99.7	99.9	97.9

Tableau 3 : Statistiques, en mGals, des écarts entre les prédictions obtenues par chaque modèle et les anomalies réduites observées.

tés C_0 , ζ , montrent que les valeurs de ces modèles $C(d)$ pour $d \leq \zeta$ sont pratiquement les mêmes, et que deux différentes fonctions donnent presque les mêmes erreurs d'interpolation ; puisque la variance C_0 détermine l'échelle des erreurs de prédiction, et la longueur de corrélation ζ décrit leur comportement pour des distances moyennes de l'ordre de ζ .

	Min.	Max.	Moy.	Dév. St.	-5 ≤ écart ≤ 5 (%)
Hirvonen - Gauss-Markov	-4.32	5.45	0.004	0.870	99.9
Exponentiel - Gauss-Markov	-13.47	13.5	0.012	2.723	92.1

Tableau 4 : Statistiques, en mGals, des différences entre les prédictions obtenues par chaque modèle et celles calculées à partir du modèle approprié (Gauss-Markov).

Cependant, et afin d'évaluer l'effet de cette différence sur la surface du géoïde, nous avons généré au premier lieu deux grilles des anomalies réduites de résolution $5' \times 5'$ avec les modèles Exponentiel et Gauss-Markov (Cas le plus défavorable en termes d'extremums, voir la Table 4). Pour chaque grille, la valeur prédite de chaque nœud a été estimée à partir des points les plus proches de son voisinage en utilisant les paramètres ajustés des modèles analytiques de covariance correspondants.

Ensuite, les deux grilles des anomalies réduites résultantes ont été transformées en ondulations résiduelles du géoïde par intégration numérique de la formule de Stokes en utilisant la technique de Transformée de Fourier Rapide (FFT) implémentée dans le programme FFTGEOID (Sideris, 1994) acquis auprès de l'IGeS (International Geoid Service). La grille $5' \times 5'$ des différences des hauteurs résiduelles du géoïde sur la zone test est représentée sur la figure 4. La table 5 résume les statistiques correspondantes. On notera, que la moyenne des hauteurs résiduelles du géoïde est de l'ordre de 40cm et leur

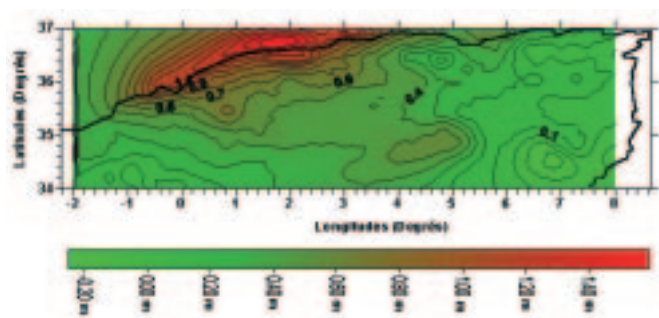


Figure 4 : Géοide résiduel (mètres).

déviatiοn standard est égale à 32cm. Elles sont maximum le long des côtes et dans les régions dépourvues des données, et d'environ 10cm à 20cm le long des levés gravimétriques. Ces écarts sont significatifs pour une détermination précise du géοide.

Minimum	Maximum	Moyenne	Déviatiοn Standard
-0.25	1.590	0.400	0.320

Tableau 5 : Statistiques, en mètre, des hauteurs résiduelles du géοide.

La seconde étape consiste à valider l'ensemble de données gravimétriques utilisées dans le cadre de cette étude pour pouvoir les intégrer, ultérieurement, dans une base de données gravimétriques qui sera conçue ultérieurement.

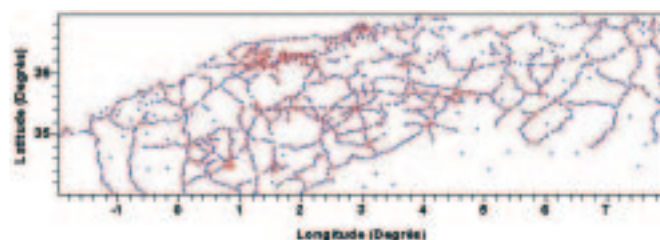
La procédure de validation a été appliquée en utilisant la méthode de collocation par les moindres carrés dans laquelle, le modèle de Gauss-Markov avec ses paramètres ajustés a été adopté comme modèle local de covariance pour exprimer la corrélation entre les données utilisées et les signaux à estimer. Les données contenues dans la zone test ont été divisées en deux ensembles disjoints **A** et **B**, à condition qu'ils aient la même distribution. Pour ce faire, un échantillonnage avec un pas de 5' (~ 10 km) sur les données contenues dans cette zone a été effectué (il ne s'agit pas de valeurs moyennes). La distribution géographique des deux ensembles **A** et **B** est représentée dans la figure 5. Ensuite, les valeurs prédites des anomalies de gravité de l'ensemble **B** ont été estimées à partir des données de l'ensemble **A**, puis comparées aux observations de l'ensemble **B**. Cependant, si la différence entre Δg_{red} et Δg_{pred} est supérieure au seuil fixé à posteriori en fonction de la précision de la donnée utilisée (20 mGals dans notre cas), alors cette observation est considérée comme suspecte et elle sera rejetée automatiquement. De même pour les données de l'ensemble **A** à partir de l'ensemble **B**. Les statistiques des mesures validées sont regroupées dans la table 6. Le taux d'erreur détecté en utilisant cette procédure est de l'ordre de 2.16% et il permet de confirmer que les données fournies par le **B.G.I.** sont de bonne qualité, et par conséquent, elles peuvent être exploitées pour la détermination du géοide Algérien ; surface de référence nécessaire pour pouvoir trans-

former les altitudes ellipsoïdiques purement géométriques issues du GPS en altitudes orthométriques et rendre par voie de conséquence opérationnel le procédé du Nivellement par GPS. En Algérie et compte tenu de l'état actuel du réseau national, cette alternative reste la seule issue à entreprendre pour espérer de couvrir, dans un avenir proche, l'ensemble du territoire national en repère de nivellement.

Anomalies	Min.	Max.	Moyenne Standard	Déviatiοn
Δg_{red}	-57.87	123.46	-0.032	22.387
Prédictions (Δg_{pred})	-46.90	121.66	0.064	19.979
Différences ($\Delta g_{red} - \Delta g_{pred}$)	-19.80	19.89	-0.096	6.394

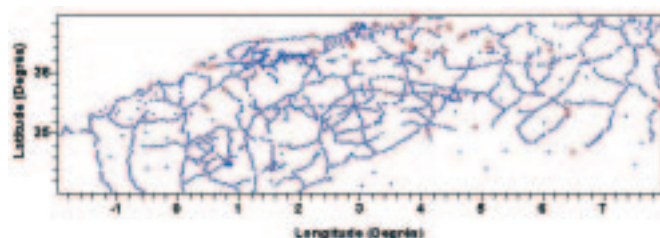
Tableau 6 : Statistiques (en mGals) des données validées.

Figure 5 : Distribution géographique des deux ensembles.



A et B - A (en Bleu), B (en Rouge).

Figure 6 : Distribution géographique des données.



validées - Points acceptés (+), Points douteux (+).

Conclusion

La méthode utilisée dans le cadre de ce travail n'est pas récente dans son principe, mais elle est d'un intérêt majeur pour la validation des mesures gravimétriques ; type de données utilisées généralement dans la modélisation du champ de pesanteur local et dans plusieurs applications en géodésie et en géophysique.

L'objectif de ce travail était de mettre en œuvre une méthodologie et des procédures permettant le choix optimum d'un modèle local de covariance à des fins de validation.

Le programme développé dans le cadre de cette étude, permet de calculer la fonction de covariance empirique et ses paramètres, de l'ajuster sur les différents modèles locaux de covariance afin d'en déduire le modèle approprié, et d'effectuer des prédictions ponctuelles et de générer des grilles régulières.

- ■ ■ L'application de cette méthodologie aux données gravimétriques d'une zone test située au nord de l'Algérie et considérée comme la plus dense, a permis de ressortir le modèle de Gauss-Markov comme modèle approprié. Cependant, il faut noter que le résultat obtenu reste tributaire de la qualité et de la densité des données utilisées dans le cadre de cette application.

Dans ce même contexte et afin de se prononcer sur la méthodologie adoptée pour le choix définitif du modèle optimum de covariance et de comparer les prédictions obtenues par différents modèles analytiques de covariance, une prédiction est faite, pour chaque modèle en utilisant ses paramètres ajustés, sur l'ensemble des points appartenant à la zone d'étude. Les résultats obtenus présentent, en fonction du modèle utilisé, des écarts extrêmes plus au moins importants. L'analyse des statistiques montre que des forts pourcentages des écarts pour tous les modèles se trouvent situer dans l'intervalle $[-10 \text{ à } +10]$ mGals et a permis de conclure que le modèle de Gauss-Markov est le modèle approprié. En outre, la comparaison des résultats de prédiction obtenus par les différents modèles avec ceux estimés par le modèle approprié de Gauss-Markov, a montré que les résultats sont presque identiques et prouve que les prédictions ne sont pas trop sensibles aux modèles théoriques de covariance utilisés, notamment, lorsqu'il s'agit de prédire des quantités similaires aux données employées.

Enfin, et afin de répondre à l'un des objectifs de cette étude, nous avons procédé, en utilisant le modèle de Gauss-Markov avec ses paramètres ajustés, à la validation de l'ensemble des données contenues dans la zone test. Le taux d'erreur détecté est de l'ordre de 2.16% et nous laisse confirmer que les données fournies par le B.G.I. sont de bonne qualité et peuvent être intégrées dans le calcul du géoïde Algérien. Néanmoins, il faut signaler la présence de graves lacunes dans la couverture gravimétrique du pays notamment dans sa partie sud qu'il conviendrait de combler aussi bien pour satisfaire les besoins de la géodésie que ceux de la géophysique et de la géologie. ●

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Prof. C. C. Tscherning (secrétaire général de l'A.I.G.) et le Prof. R. Forsberg de l'université de Copenhague pour leur avoir fourni le logiciel GRAVSOF, et le Prof G. Balmino pour avoir mis à leur disposition les données gravimétriques sur l'Algérie.

Contacts

BENAHMED DAHO S. A., SAHEL C., ZEGGAI A.

Centre National des Techniques Spatiales,
Division de Géodésie - BP 13 Arzew - 31200 - Algérie.
d_benahmed@hotmail.com

Références bibliographiques

- Moritz H., 1980.** *Advanced physical geodesy*. Edition Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Heiskanen, W.A., H. Moritz, 1984.** *Physical Geodesy*. 2^e édition Institute of Physical Geodesy, Technical University Graz, Austria.
- Heiskanen, W.A. and H. Moritz, 1967.** *Physical Geodesy*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Rapp R. H., Y.M. Wang, and N.K. Pavlis, 1991.** *The Ohio State 1991 Geopotential and Sea Surface Topography Harmonic Coefficient Models*. Report N° 410, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus.
- Tscherning, C. C., Forsberg, R., Knudsen, P., 1992.** Description of the GRAVSOF package for geoid determination, Proceedings of First Continental Workshop on the Geoid in Europe, Prague, pp327 - 334.
- Sediris, G., 1994.** *Geoid determination by FFT Techniques*. Lecture notes for the international school for the determination and use of the Geoid. International Geoid service. DIIAR. Milan.

ABSTRACT

Keywords: Collocation, Geopotential model, validation procedure.

The validation is an extremely strict procedure that guarantees quality and integrity of the gravity data bank. It is applied systematically to all sets of data before being integrated into the data bank. Its principle consists of comparing the observed value and the predicted one estimated by a powerful technique like Collocation method. Nevertheless, the difficult step in its application is the determination of the empirical covariance function and subsequently the selection of its corresponding analytic representation capable to describe the local behaviour of the gravity field. Therefore, the main goal of this paper is to propose a procedure for the selection of the optimal analytical covariance model for the validation purposes. Several local analytical covariance functions broadly used in physical geodesy were tested and the most suitable will be selected in test area from a statistical procedure. For this purpose, the gravity data provided by the B.G.I., consisting of 2041 gravity measurements covering the north part of Algeria between the limits $[34^\circ, 37^\circ]$ in latitude; and $[-2^\circ, 8^\circ]$ in longitude, and the tailored geopotential model OSU91A complete to degree and order 360, have been used to test the developed methodology. The validation was applied to predict free air gravity anomalies reduced from the effect of the spherical harmonic coefficient set OSU91A. The error ration detected using this technique represent 2.16% which remains small with regard to the number of measures used, and proves that the gravity data measurements provided by B.G.I. are good quality and subsequently, can be used for the Algerian geoid computation. Furthermore, this work shows also the non-homogeneity of the gravity data in experimental area and their insufficient accuracy.

Les dessous de Paris "Cartes sur table" (2^e partie)

■ Gilles THOMAS

"M. Edmond Texier a entrepris le voyage de Paris, voyage de fantaisie et d'humour, à travers les monuments, les mœurs, les singularités et les dessous de cartes et de rues de la grande ville, géographie pittoresque dont Mercier a jadis dressé l'atlas. Les Parisiens sont ceux-là mêmes qui connaissent le moins Paris, comme les livres de sa bibliothèque, qu'on ne lit pas pour les avoir à la portée de la main et des yeux." in "Tableau de Paris" paru en Feuilleton dans "La Presse", numéro du 9 mars 1852 faisant le compte-rendu d'un ouvrage d'Edmond Texier journaliste et homme de lettres prolixe (né à Rambouillet 1816, décédé à Paris en 1887)

L'IDC un service plus que bicentenaire, qui vit désormais avec les outils de son temps

Lors de l'Exposition Internationale Universelle de 1900, le pavillon de la Ville de Paris présenta un grand nombre de documents intéressant la topographie parisienne. Parmi les plans nouveaux, il est juste de mentionner le *"Plan général de Paris et de ses environs, comprenant les bois de Boulogne et de Vincennes, dressé à l'échelle de 1/5000^e par les géomètres du Service municipal du Plan de Paris"*. Mais il convient aussi de citer hors catégorie, deux grands panneaux : l'un, présenté par la Préfecture de la Seine, réunissait les 105 feuilles de la *"Carte du département de la Seine à 1/5000^e (gravé de 1894 à 1900)"*. Le second panneau, emprunté à l'*"Atlas des Carrières souterraines de Paris"*, consistait en un *"Assemblage des feuilles [une soixantaine] de la région Sud-Ouest, montrant les travaux de consolidation exécutés dans cette région ; publié... sous la direction de MMrs Keller, inspecteur général des Mines, et Wickersheimer, ingénieur en chef des Mines, inspecteur général des Carrières, avec la collaboration de MMrs Humbert, Pellé et Weiss ; gravé par L. Wuhler, 1894-1900. Échelle 1/1000^e"*. Étaient placés en regard deux panneaux de plans originaux au 1/200^e. Au sein de la Classe 14 de cette EU1900

Certaines informations pratiques (état des galeries, présence d'eau, etc.) ne figurent pas sur les planches de l'Inspection des Carrières. De même, avant que des amateurs, au départ très souvent issus de l'École nationale des Mines ou de Polytechnique, ne se décident et œuvrent à la création de plans permettant de visualiser l'ensemble des galeries sous Paris réseau par réseau (d'une part le Grand Réseau Sud = 5^e, 6^e, 14^e et 15^e arrondissements ; d'autre part le 13^e ou le 16^e arrondissement) l'IDC ne disposait que d'un tableau d'assemblage, renvoyant le personnel de sa propre brigade intervenant dans les sous-sols aux plans de détails couvrant une surface de 600m sur 400m. Les plans non officiels des "cataphiles", de par leur praticité, sont maintenant utilisés par les autorités (police et IDC) ce qui leur donne une certaine légitimité. Et même si l'on considère qu'ils ne sont pas aussi précis que les plans dûment estampillés, quoique ! ils possèdent des informations uniques parce qu'ils ont au départ été établis pour se déplacer sous Paris, et même atteindre des secteurs censés être inaccessibles sauf à faire creuser un puits d'accès spécialement à partir de la surface. Ces informations inédites ne sont néanmoins pas reportées sur les plans de l'IDC, (même lorsque ce sont des secteurs inconnus qui ont été explorés) leur objet final n'étant pas le même ; ce qui fait que parfois il est plus intéressant d'avoir recours à ces représentations "clandestines".

Le même genre de plan "cataphile" existe aussi maintenant pour certaines carrières de la banlieue parisienne, établi en ne reprenant que le contour des galeries souterraines, réunissant et rassemblant par la même les différentes cartes de l'IDC sur lesquelles la topographie de la carrière était auparavant répartie. De plus les cataphiles ne se contentent pas de calquer les planches IDC, ils s'ingénient là aussi à aller sur place pour vérifier les secteurs qui leur paraissent ambigus et lever tous leurs doutes. Il arrive même à certaines municipalités de demander officiellement l'aide de spéléologues pour cartographier un secteur indiqué non topographié, ou pas vérifié depuis un très ancien plan, la zone étant devenue accessible à la suite d'un fontis.

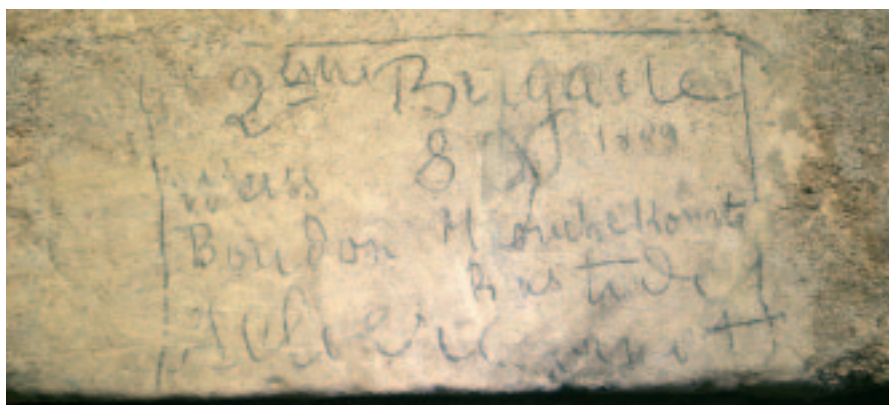
Nul ne peut se battre indéfiniment contre le progrès, et en l'occurrence vouloir s'opposer à l'élaboration de cette double cartographie occulte (cartographie non estampillée par une autorité, et de cette doublure sombre de la Région parisienne) c'est se battre contre des moulins à vent !

(= "Cartes et appareils de géographie et de cosmographie. Topographie"), il était aussi possible de retrouver une partie du panneau des Carrières de Paris, ainsi que plusieurs spécimens de la Carte du département de la Seine.

De nos jours ce sont plus de 450 cartes qui existent, au format de 60 x 80cm : 137 pour Paris intra-muros (savoir 101 cartes pour le calcaire grossier et 36 pour le gypse) et 320 pour la banlieue (142 pour les Hauts de Seine, 87 pour la

■■■

© photo Franck Albaret



Paul Weiss fut Inspecteur général des carrières à partir du 24 juillet 1907 jusque fin 1911. Entré à l'Inspection fin septembre 1899, il collabora à l'exécution d'un certain nombre de planches de l'IDC sous la direction de Wickersheimer son prédécesseur. Sous Paris on trouve encore la trace de l'exercice de topographie qu'il réalisa en 1889, lorsqu'il était élève à l'École des Mines.

■ ■ ■ Seine St-Denis, et 91 pour le Val de Marne, ou selon la répartition par matériau extrait : 170 dans le calcaire et 150 dans le gypse), auxquelles il faut ajouter 7 cartes de synthèse au 1/20 000^e pour Paris et les trois départements de la petite couronne + le tableau d'assemblage global au 1/50 000^e (sans compter la planche servant de légende pour l'ensemble des cartes au 1/1000^e).

Les cartes au 1/1000^e présentent une planigraphie précise des surfaces des anciennes exploitations connues, ainsi que le détail indispensable de ce qui est vide résiduel, galeries de circulation, parties remblayées, masse encore en place, et piliers de soutènement réalisés. Sont aussi précisés des hauteurs de vides, l'existence de marches en ciel, de voûtes, les ciels tombés, les fontis avec parfois un historique (au moins la datation lorsqu'elle est connue), des affaissements de terrain, de même que les indispensables accès (comblés ou non) dont les adresses et les caractéristiques sont ajoutés dans la marge des cartes (et pour certains une coupe de la surface du sol jusqu'au banc de marche de la carrière, présentant donc la hauteur d'exploitation et la composition des terrains de recouvrement). Les différents niveaux d'exploitations (jusqu'à 3 au maximum sur une même feuille) sont identifiés par des couleurs spécifiques. Il convient de noter que l'ensemble des planches des carrières sont centrées autour de l'Observatoire de Paris, qui après avoir été le centre du

monde astronomique connu lors de sa création, est donc aussi devenu le référent de l'univers souterrain répertorié et cartographié ; ainsi il est précisé par exemple que la "Feuille comprenant partie des quartiers de Montparnasse et du Petit-Montrouge" (soit l'actuelle numérotée 25-50), s'étend "de 0 à 400 m au Sud de l'Observatoire de Paris, et de 0 à 600 m à l'Ouest *ibidem*".

L'actuel Atlas des anciennes carrières souterraines couvre bien évidemment le domaine de compétence de l'Inspection à savoir : Paris et les trois départements de la petite couronne. Une annexe de l'IGC Paris existe à Versailles pour l'ancien département de la Seine et Oise. Ce service a été créé par un arrêté préfectoral en date du 25 avril 1967, suite entre autres à l'accident de Clamart, un affaissement généralisé qui fit 21 morts en 1961, et qui fit prendre conscience que ce phénomène pouvait se reproduire ailleurs. L'IGC Versailles est chargée de la topographie des anciennes carrières souterraines abandonnées des départements des Yvelines, de l'Essonne et du Val-d'Oise, ce qui représente 1 400 hectares de terrains sous-minés, dans 216 communes recensées : 96 dans le 78 (soient 1 600 caves et carrières), 8 en Essonne (seulement 12 sites souterrains), et 112 dans le 95 (représentant 1800 cavités), ainsi que la diffusion des renseignements à destination du public. Les plans ici sont réalisés sous une présentation noir et blanc, les vides étant positionnés



© Franck Albaret

Lorsque l'on réalise la cartographie d'une carrière exploitée par piliers tournés, rien ne ressemble plus à un patatoïde dessiné pour représenter une masse de calcaire que la représentation d'un autre pilier, et sur place les topographes se trouvent parfois confrontés à une forêt de piliers. D'où ce subterfuge utilisé de numéroter les piliers et de reporter ce numéro sur les cartes pour s'y retrouver plus facilement. Le "19" visible ici date du XVIII^e siècle.

sur les plans cadastraux soit sous une forme dite "expédiée" qui ne dessine que le pourtour des carrières, soit sous leur forme aboutie dessinant l'emplacement exact et le détail des vides accessibles, ainsi que le positionnement des autres vides alentour. On le voit, de tous les départements de la Région parisienne, les sous-sols de la Seine et Marne ne sont supervisés par aucun service des carrières ; en conséquence, à la demande de la Préfecture et du Conseil Général du département, cet inventaire a été récemment attribué au Laboratoire des Ponts et Chaussées ainsi qu'au BRGM qui le réalisent à partir du travail effectué par un couple de particuliers (Joëlle et Patrick Pallu¹) qui s'étaient investis dans cette tâche de longue haleine depuis de très nombreuses années, et qui font désormais partie prenante du Plan de Prévention des Risques liés aux carrières et aident en tant que de besoin les services de secours type GRIMP².



Plan du cimetière Montparnasse extrait de "l'Atlas souterrain de la Ville de Paris" de Eugène De Fourcy (Paris 1859). (collection particulière)
On comprend parfaitement ce qui est décrit par certain comme un "un véritable tour de force graphique en même temps qu'un bon révélateur du mélange d'angoisse et de fascination exercé par le monde souterrain au XIX^e siècle, avec ses formes indécises qui semblent ramper sous les immeubles de la ville. Elles font songer à des cultures de bactéries ou à des vers en passe d'engloutir des quartiers entiers de la capitale. Les craintes suscitées par le souterrain trouvent ici une expression graphique des plus nettes, même si la cartographie a pour fonction de les apprivoiser".

Jusqu'en 1999, date d'apparition de la DAO (= dessin assisté par ordinateur) à l'Inspection, la mise à jour des cartes était effectuée manuellement. Depuis, l'ensemble des cartes a été scanné avec une résolution de 300 dpi (générant des fichiers de 40 à 60 Mo) ; les éléments constitutifs du plan sont alors vectorisés, et les ajouts ou les modifications à effectuer suite à de nouveaux travaux souterrains sont intégrés au moyen de tables à digitaliser. Cette vectorisation des cartes se déroule au rythme de 15 par an.

En 1968, la numérotation des cartes fut modifiée : d'un simple numéro d'ordre séquentiel, on appliqua le principe d'un tableau à deux entrées. Par exemple la planche 25-50 correspondant au secteur autour de la place Denfert-Rochereau, était autrefois identifiée par le numéro 281. Ces plans, destinés à être vendus³, sont tirés à 200 exemplaires, ce qui semble un bon compromis permettant d'atteindre l'obsolescence de la carte (sans générer trop de pertes), et donc la décision d'en faire effectuer un nou-

veau tirage intégrant toutes les modifications intervenues depuis l'édition précédente, tant au niveau du sous-sol (suite aux prescriptions émises par l'Inspection des carrières lors des dépôts de demande de PC) que du bâti (dû aux transformations urbanistiques indissociables d'une grande métropole).

En parallèle, d'autres plans virent le jour officiellement ... et même clandestinement !

Pour différentes raisons, d'autres administrations durent effectuer leurs propres topographies souterraines. C'est le cas du "Ministère de la guerre" qui, au XIX^e siècle, fit effectuer de tels relevés à l'aplomb de ses biens immobiliers (par exemple le Val-de-Grâce, le parc à fourrages militaire de Vaugirard, ou des forts de l'enceinte de Paris). Et cela fit aussi partie de l'enseignement dispensé dans certaines Grandes Écoles

parisiennes : ainsi et chronologiquement de l'École Nationale Supérieure des Mines, de l'École Centrale ou de l'École Supérieure de Géomètres et Topographes (= SupGéTo).

À l'origine, l'École des Mines formait les futurs ingénieurs qui partaient de par le vaste monde pour s'occuper des différentes concessions minières réparties sur le globe ; le cursus des élèves comportait en conséquence l'enseignement de la topographie souterraine. Les bâtiments de l'École des Mines se trouvant eux-mêmes sous-minés par des galeries de servitude de l'IDC, quoi de plus naturel que d'y organiser les exercices pratiques de topographie souterraine. C'est ainsi que des générations d'élèves se succédèrent, dès le XIX^e siècle et jusqu'à la mi-XX^e siècle dans trois-quatre secteurs bien définis des anciennes carrières souterraines de Paris, afin de s'y initier au levé à la planchette, au maniement du théodolite, et à la mise au net sous forme de plans aquarellés, des relevés effectués sous terre. Du résultat

- (1) J. et P. Pallu ont été impliqués dans la recherche de cavités sur le parcours du TGV Est, dans la recherche de la jeune Estelle Mouzin disparue en Seine et Marne (à la demande du SRPJ de Versailles), etc. Ils ont recensé déjà dans leur département, plus de 500 communes affectées par des carrières souterraines, des cavités naturelles, des souterrains artificiels, des aqueducs désaffectés, et même un tunnel abandonné !
- (2) GRIMP : Groupe de Recherche et d'Intervention en Milieu Périlleux, basé à Chelles. Pour Paris et les trois départements limitrophes, l'équivalent est le GREP (= Groupe de Recherche et d'Exploration Profonde) équipe spécialisée de la BSPP (= Brigade des Sapeurs Pompiers de Paris).
- (3) L'accueil du public pour la consultation des planches du sous-sol de Paris, et des trois départements 92, 93 et 94, ainsi que leur achat, s'effectue au 3, avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy (métro et place Denfert-Rochereau) les lundis, mercredis, et vendredis de 9h00 à 11h45. Pour les plans des sous-sols du 78, 91 et 95, s'adresser à l'Inspection générale des carrières abandonnées, 147 rue Yves Le Coz - 78000 Versailles (01 39 25 12 12).

■ ■ ■ de ces exercices pratiques souterrains, nous n'avons retrouvé que peu d'exemples, alors que nous avons pu réaliser *in situ* l'inventaire des groupes de TP de topographie qui se succédèrent dans les entrailles de Paris, à l'initiative principalement de deux professeurs : Louis Naudin (de 1893 à 1937 pour les Centraliens), et de Robert Taton (le bien nommé ; pour les Mines, Supgéo et le CNAM). Cet enseignement cessa pour Supgéo au moment de sa première délocalisation à Evry en 1978 (l'école s'expatria par la suite au Mans l'été 1997), et pour les Mines suite à une réforme importante de l'enseignement qui eut lieu entre 1962 et 1964. Quoi qu'il en soit, cet enseignement n'aurait de toute manière pas pu perdurer éternellement, la dernière mine de charbon de France ayant fermé en avril 2004 (c'était La Houve, en Moselle)... sauf pour la beauté du geste, car il faut bien reconnaître que les plans aquarellés que nous avons eu la chance de pouvoir consulter sont de véritables œuvres graphiques, tant ceux des élèves que ceux du Service Historique de l'Armée de Terre.

Cet enseignement souterrain était particulier de par le lieu de son exécution : celui-ci permettait aux élèves de se confronter aux conditions réelles qu'ils auraient eu à rencontrer par la suite (obscurité, humidité, aspect labyrinthique semblant inextricable, etc.). Mais surtout cette expérience initiait les étudiants à la présence du labyrinthe subparisien abusivement dénommé Catacombes, et qui a toujours fasciné la population avide d'y projeter ses fantasmes les plus invovables. Sans cette formation pratique, les géomètres appelés à intervenir sous terre auraient pu parfois être déroutés par les conditions bien particulières et souvent inattendues des opérations souterraines, et des levers afférents. Les relevés du sous-sol ont en effet leurs impératifs propres qui échappent aux "Géomètres du jour". Ceci avait débouché sur des conventions pour les levers souterrains des mines : si les exploitations ne présentaient pas plus de 3 étages, on les faisait figurer en général sur le même plan avec des teintes conventionnelles, habi-



© Franck Albarét

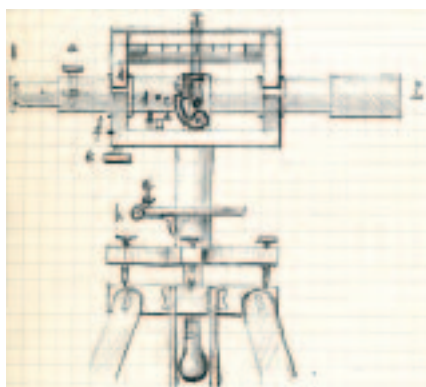
Ce niveau à lunette a été dessiné sur les parois de la rue St-Jacques (comprendre la galerie souterraine éponyme) lors d'un exercice topographique datant de 1955. À proximité se trouve l'inscription "Ici nous coïncâmes la bulle" laissée à la même époque, et qui est interprétable dans les deux sens : réglage du niveau de l'appareil, mais aussi famientier ! (voir page suivante).

tuellement le violet, le vert et le carmin. Dans le cas contraire, un plan était élaboré pour chaque étage sur des transparents superposables. Sur les planches des carrières nous retrouvons un peu ces mêmes caractéristiques : jusqu'à 3 niveaux d'exploitation différents par feuille au maximum, et deux séries de teintes sont affectées à chacun des étages, supérieur et inférieur, du calcaire grossier comme du gypse.

L'habillage de ces plans et des coupes est bien évidemment un travail supplémentaire, mais c'est aussi un plus. Cette opération consiste à reporter sur le document, en suivant des normes, toutes les indications utiles pour les multiples services qui auront à consulter les plans. Mais trop d'informations nuit parfois à la lisibilité du propos, d'où une réappropriation des plans avec la réalisation d'une nouvelle schématisation associée à de nouveaux symboles en fonction des besoins, tant par les clandestins que par les autorités.

Après avoir découvert cet univers souterrain qui n'est pas sans charme, hormis son intérêt historique indéniable, certains élèves envisagèrent et s'essayèrent à y retourner purement pour le plaisir, pour la simple balade en s'affranchissant de la contrainte d'avoir à

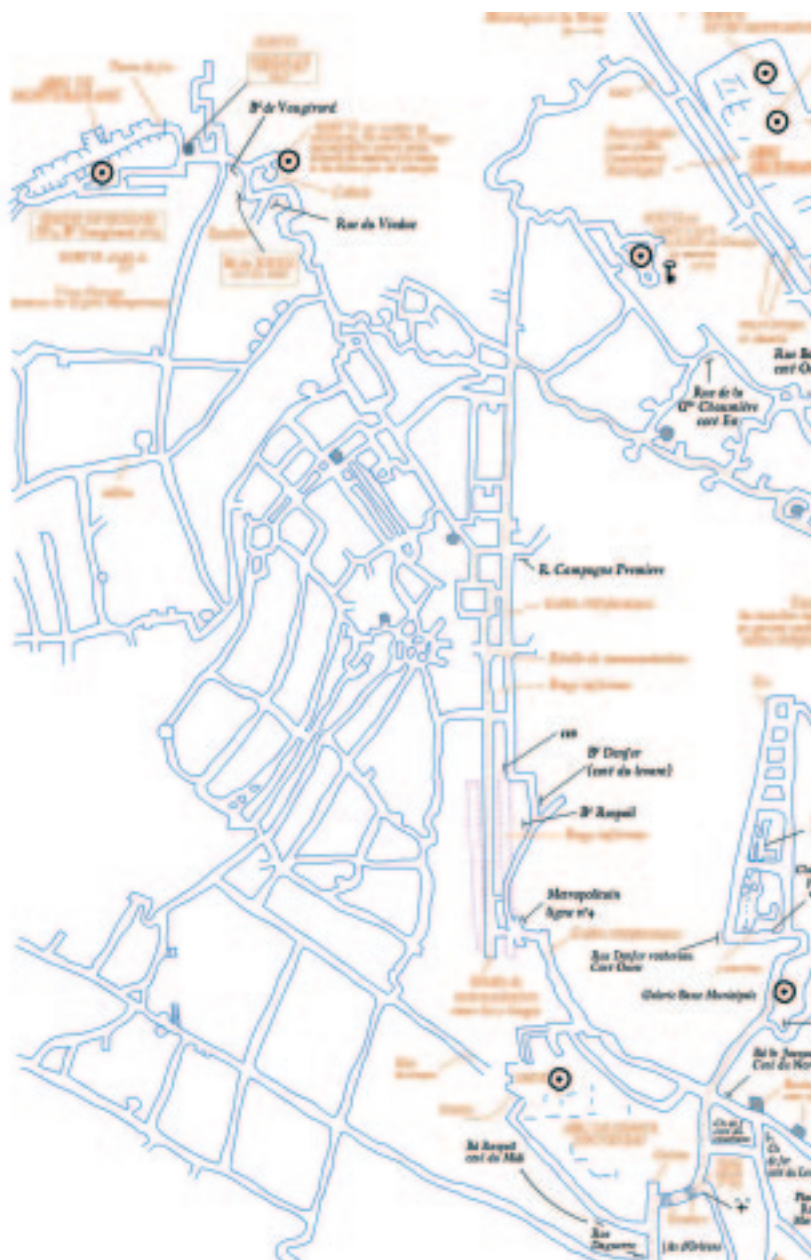
n'y être que pour un travail scolaire noté. Les planches de l'Inspection étant complexes (peuvent s'y trouver plusieurs niveaux, plus le tracé de galeries techniques telles que le métro, le cadastre, ainsi qu'une foultitude d'informations... pour une couverture de seulement 600 m sur 400), le plus simple pour ces amateurs, fut à l'époque de n'y calquer sur l'ensemble des planches que le tracé des galeries (soit sous la forme d'un seul trait "moyen" – le plan est alors dit "fil de fer" ou tout simplement filaire – soit de deux traits matérialisant la largeur de la galerie). Puis de réduire les dessins obtenus et d'assembler l'ensemble de manière à disposer d'un plan manipulable tenant sur une feuille plus ou moins grande (du A0 au format lisible minimal A4), permettant de disposer en un seul coup d'œil de l'intégralité du réseau souterrain (savoir plus de 100 km de galeries pour les 5^e, 6^e, 14^e et 15^e arrondissements réunis, 25 km pour le 13^e et seulement 7 km pour le 16^e). Une autre méthode fut de descendre en carrières, parcourir l'intégralité du réseau boussole et décamètre en mains, et d'en faire un levé succinct mais néanmoins utilisable. Firent quasiment ainsi, entre autres les docteurs René Suttel et Jean Talairach, lorsqu'ils découvrirent l'existence du "Grand



Dessin d'un niveau à lunette, datant de 1920. Pour son utilisation, cet appareil doit être placé à la verticale d'un point de coordonnées connues, d'où l'utilisation d'un fil à plomb. Et pour le réglage de l'horizontalité on se sert d'un niveau à bulle (visible ici au dessus de la lunette)... de là l'expression "coincer la bulle", car cette activité ne demande pas trop d'effort physique !

Réseau Sud" à partir de l'hôpital Ste-Anne où ils étaient affectés durant l'Occupation. Ils dressèrent un plan à double-trait de 1943 à 1945, en espérant qu'il pourrait servir à la Résistance.

Le plan du docteur Suttel n'est pas très juste au niveau représentation des galeries, surtout dans certains secteurs (par exemple sous le cimetière Montparnasse), mais il est strictement isomorphe (les nœuds du réseau sont parfaitement corrects). Cela tient aux conditions et à la méthode de relevé. De toute manière il répond avant tout à une nécessité : *"la possibilité pour un lecteur de se diriger facilement dans le réseau des carrières, de se rendre d'une issue à une autre sans s'égarer en connaissant les modes et les facilités éventuels de sortie"*, d'où aussi le report sur ce plan d'inscriptions gravées dues à l'IDC ou d'autres repères visuels (informations absentes des planches de l'Inspection), et des indications telles que : *"Puits de sortie par échelle et trappe circulaire devant la Laiterie parisienne 42 bd Pasteur"*, avec indication du nombre de marches pour les escaliers. *"Ce travail, fait dans la clandestinité pendant de longues nuits, ayant pour but essentiel le passage aisé et rapide d'un point à un autre, avait exclu volontairement tout*



Sur le plan levé pendant la seconde guerre mondiale par les Docteurs René Suttel et Jean Talairach, certaines parties sont visuellement fausses, bien que topologiquement exactes (les nœuds du réseau sont parfaitement isomorphes à ceux d'une représentation topographiquement correcte). Ainsi en est-il des galeries sous le cimetière Montparnasse, à comparer avec les deux autres plans de cet article !

rapport avec l'administration des carrières", ce qui est la "norme" pour tous les plans "clandestins" des carrières de Paris jusqu'à nos jours. Sur le "Suttel", les dissimilitudes les plus grandes, par rapport aux plans (filaires ou non) calqués viennent du mode de repérage topographique : *"Le tracé de chaque galerie a été réalisé en comptant les distances en nombre de pas, chaque changement important d'orientation ayant*

été noté à la boussole. Le repérage en surface n'a été possible qu'en utilisant, soit des escaliers, soit des puits à crampons par lesquels nous accédions aux trappes circulaires en fonte [par en dessous], traçant à la peinture une marque, chaque fois différente, dans l'épaisseur de l'orifice médian. Le contrôle en surface se faisait ensuite de jour, en se déplaçant à bicyclette", restrictions de guerre obligeant !

Le renouveau de la cartographie souterraine parisienne par le prisme des "cataphiles"

Une technique mixte fut de calquer l'ensemble des plans de l'IDC, puis d'aller sur place vérifier toutes les ambiguïtés dues à la surabondance d'informations. Sur ces plans, parfois sont dessinés "comme sur une carte routière, les détails hors échelle pour que ça soit lisible". De plus sur un plan particulier connu sous le nom de "Giraud-La Fouine" un apparenté d'historique fut ajouté sous la forme de dates rappelant des condamnation d'accès, voire des ré-ouvertures. Mais la diffusion à grande échelle d'un tel exercice de cartographie à vocation nettement moins technique que les planches de l'Inspection, se retrouve être à l'image de la langue d'Ésope : la pire et la meilleure de choses. Cela permet effectivement "de faire connaître cet univers incroyable qui risque de disparaître sous les injections de béton", mais cela ouvre aussi la connaissance et la possibilité pour des personnes irrespectueuses et donc indésirables (voleurs du mobilier historique que constituent les plaques de localisation du XVIII^e siècle ou de la création du métropolitain, taggeurs, et autres vandales auteurs de profanations ou dégradations irréversibles) de pénétrer la double topographique du "Paris du siècle des lumières". En revanche un tel travail n'est valable, comme pour un logiciel, que si des mises à jour régulières existent : "Je sortais de nouvelles versions régulièrement, pour tenir compte des changements".

Et apparition du réseau des réseaux oblige (= Internet), ce travail fut alors mis en commun afin que de nombreux contributeurs puissent ajouter des points de détail qu'ils avaient vérifiés. "Pendant ce temps, ma famille s'agrandissait, ça plus le boulot, il m'était de plus en plus difficile de descendre, et les dernières versions ont été faites grâce aux infos que certains me remontaient, dont la célèbre Fouine, qui un jour m'a demandé de numériser le plan. J'ai dit oui, je crois que c'était en 1990. Je ne suis pas redescendu depuis, gardant le souvenir magique de ces sou-



© Jean-Luc Lartigier

"Mise au net" de Maurice Bourbonneux (ECP 27) miraculeusement retrouvée dans une poubelle. Malgré les quelques modifications observées sur place, elle a pu être parfaitement localisée sur le terrain, ou plutôt sous le terrain du secteur Val-de-Grâce – Hôpital Cochin où eurent lieu les exercices topographiques de l'École centrale entre 1900 et 1937. On demandait aussi aux élèves de dessiner un certain nombre de coupes.

terrains endormis. J'ai su que la Fouine avait poursuivi l'œuvre, apportant des modifications et continuant à diffuser le plan." Sur la version informatique de ce plan, ce ne sont pas moins de six couches différentes qui ont été définies, chacune consacrée à un type d'information : tracé des galeries, localisation des accès, emplacement des inscriptions sur les parois des galeries, etc. Malgré tout, à l'origine, cela avait nécessité un travail de bénédictin pour une seule et même personne : "La constitution du plan lui-même m'a pris de nombreuses heures, le week-end et en vacances, et j'y ai perdu deux dixièmes aux yeux". L'intérêt d'un tel plan est de s'y perdre pour mieux s'y retrouver, en parcourant ce Paris souterrain virtuellement : "Et puis progressivement, l'œuvre a dépassé son utilité première : j'ai voulu un plan fidèle, exhaustif, agréable à regarder... je m'y, voyageant sur mon plan autant que dans le réseau lui-même."

Il est à noter que la représentation des plans avec le Nord en haut de la feuille répond à une simple convention purement arbitraire, mais malgré tout rarement dépassée. Un élève d'une grande école parisienne, qui a circulé dans les carrières de Paris à la fin des années 50, nous a ainsi fait remarquer

que pour lui le plan tel qu'il est dessiné, est à l'envers. Dans son cas cela se comprend aisément parce que comme il pénétrait souvent dans les galeries sous Paris par des accès situés au Nord du réseau principal, pour cet élève il était tout naturel de représenter les galeries à partir de ces points d'accès et donc de les dessiner au fur et à mesure de leur découverte, ce qui aboutit à un plan inversé. Et puis après tout, lorsque nous sommes dans ces galeries, ne sommes nous pas dans un autre Paris, dans un univers miroir qui reflète bien autre chose que nous-même. Et comme dans tout miroir il y a inversion de la réalité : la gauche et la droite sont inversées. Sous Paris, nous sommes on le sait toujours dans Paris, mais dans un monde où tout est "sens dessus dessous", où il n'y a plus ni jour, ni nuit, ni plus vraiment de haut et de bas puisque nous marchons encore dans Paris, mais en ayant toujours et constamment la ville au dessus de notre tête.

Comme plan de circulation sous Paris, il est intéressant de noter que le personnel de l'IGC, (ne disposant à l'origine que des planches au 1/1000^e ou du plan d'assemblage donnant simplement le découpage et la numérotation des planches) a maintenant recours au

plan établi par les clandestins, tout comme les forces de police amenées à y intervenir. De son côté, la police a elle aussi scanné l'ensemble des plans IDC, dont elle n'a gardé que le niveau des galeries souterraines pour une raison de lisibilité évidente ; elle peut alors effectuer des éditions à façon, i.e. ne faire imprimer que sa zone d'intervention couvrant le parcours devant être emprunté. Un travail similaire de numérisation a donc été effectué par différents services officiels sans semble-t-il vraiment de mise en commun ...

On le voit et on le conçoit aisément, le principe fastidieux du calque a avantageusement été remplacé par la numérisation ; il faut dire qu'à peine une dizaine de personnes s'étaient ingénérées à calquer l'ensemble des planches IDC couvrant Paris. Tandis que de nos jours, il existe aussi plusieurs bases de données "cataphiles" sur lesquelles on trouve l'intégralité des planches IGC scannées (avec une résolution là-aussi de 300 dpi), ce qui a pris à peine un an, avec pour certaines bases la même planche consultable selon ses différentes rééditions, ce qui présente un intérêt certain pour les recherches historiques.

Dernier avatar de ce "plan de circulation clandestin" : certains se dirigent maintenant sous Paris avec une version consultable directement sur Palm Pilot™. À l'image de la bataille perpétuelle et éternelle entre l'arme de jet et le bouclier (dont l'amélioration de l'un entraîne la modernisation de l'autre), il semblerait que pour l'instant les autorités officielles aient encore un léger retard par rapport à certains utilisateurs de cette base de données que constituent les plans souterrains de Paris.

Et demain ? Suite et poursuite de l'expérience et du travail de l'IDC

Cette histoire des plans de carrière possède un dernier développement inattendu parce que lié à la gestion des déchets radioactifs par l'ANDRA. Chacun sait qu'un site de stockage à très long terme est en cours d'étude à Bure (Meuse), dans une cavité arti-



Voici un extrait d'une des dernières réalisations cataphiles et des plus abouties en terme de report sur le plan d'information diverses et variées. Ce plan est téléchargeable sur Internet sur le site "Cube". Dans une version ultime il est prévu d'en illustrer la surface par des photos aériennes des monuments de Paris emblématiques, et pourquoi pas des jardins parisiens en actualisant ceux-ci au fur et à mesure des modifications de leur dessin paysager.

cielle creusée au sein de la couche d'argile située à 500 m de profondeur. Si ce problème du devenir des déchets est à l'étude, son corollaire, la persistance de la mémoire de ce site pour les générations futures n'est pas non plus négligé, et c'est là qu'il est envisagé de faire appel au passé de l'Inspection des carrières de Paris... non pour une histoire de cartographie, mais de plans !

Tout d'abord la connaissance de l'existence de ce site de stockage est rédigée sur un support papier dit permanent parce que à très longue conservation (estimée à plusieurs centaines d'années, au moins un demi-millénaire, ce qui est néanmoins peu à l'échelle des centaines de milliers d'années nécessaires à la dégradation naturelle de la radioactivité), spécialement créé pour l'occasion. Pour archiver ces écrits, il a bien entendu été fait appel aux Archives Nationales, mais il est aussi envisagé de déposer cette information dans les mairies, chez les notaires, à l'Académie fran-

çaise (qui possède et a su conserver ses propres archives depuis plus de 300 ans), ainsi qu'au niveau de l'IGC qui a su garder ses propres plans depuis à peu près aussi longtemps (plus de deux siècles). L'exemplarité de ce service – au travers de ses plans – est donc mise à profit dans ce nouveau domaine totalement inattendu.

Mais il ne faudrait pas que, suite à cet article, on pense que les quelques racines de l'arbre que représentent les carrières souterraines masquent l'abondance du chevelu racinaire de la forêt que constitue l'ensemble des galeries occupant le sous-sol de Paris ; la cartographie du sous-sol de Paris n'est pas exclusivement restreinte à ces anciennes carrières souterraines, loin de là. En fait à Paris, on recense une trentaine de concessionnaires différents, gestionnaires de réseaux souterrains qui leur sont propres : le premier en développement le Service des Égouts (pour 2300 km), le Chauffage urbain (plus de 400 km de

■ ■ ■ réseau), la RATP (Métro + RER, représentant 200 km de galeries, qui voient passer tous les jours 4.5 M de voyageurs dans le Métro uniquement + 1.5 M de voyages quotidiens dans le RER ; sans oublier 260 km de couloirs de correspondance), EDF (120 km de galeries), FranceTelecom (50 km de galeries en sites propres, i.e. compte non tenu des galeries IDC autrefois louées à la Ville de Paris), la Climatisation (40 km, réseau en extension constante), les anciens aqueducs du Moyen Age (sur la Rive Droite), l'aqueduc Médicis (sur la Rive Gauche, et datant du XVII^e siècle), le Canal Saint-Martin, les parkings souterrains, etc. Un plan général de synthèse regroupant toutes ces informations dispersées est en cours d'élaboration, après une première approche testée en 1993 en DAO. Les plans anciens déjà existant sont scannés, vectorisés, calés les uns par rapport aux autres avec vérification des points d'achoppement sur le terrain, puis digitalisés. C'est la Ville de Paris qui a obtenu la maîtrise de l'établissement de cette cartographie totale du sous-sol qui permettra de se le représenter quasiment en 3 dimensions (arrêté du 1^{er} février 1978), les concessionnaires devant remettre dans un délai de six mois après la fin de leurs travaux, un plan de chaque nouvel ouvrage réalisé. Ceci évitera peut-être des surprises comme celle survenue au niveau du bâtiment de l'IDC lui-même quand, lors du percement du nouvel escalier d'accès des Catacombes en 1982, les ouvriers sont tombés sur une galerie appartenant à la RATP, présente là bien mal-ta-propos.

Le sous-sol de Paris recèle encore, à défaut de mystères insondables, d'autres potentialités de surprise, ne serait-ce que par la présence d'anciens abris de Défense Passive aujourd'hui oubliés, quand ce ne sont pas des abris anti-atomiques actuels bien réels mais classifiés Secret Défense, et qui n'ont donc de présence avérée que virtuelle !

Remerciements

Merci à Daniel Chailloux et Françoise Lidonne (pour l'initiation à la topographie souterraine en carrières), Frieda



© Jean-Luc Largier

Voici un exemple des très nombreux "clous", ici le numéro 17, encore visibles sur place sous Paris, autrefois utilisés par les élèves comme stations topographiques pendant leurs levers souterrains. La jeune spéléologue permet de se faire une bonne idée de la hauteur moyenne des galeries sous la capitale.

"Hibou" pour son intérêt pour les plans voire plus, Aurélie Corre pour tout et le reste, et Mireille Skrzyrbak (si elle avait su que relire mes modestes incursions dans l'écriture prendrait une telle ampleur...). Mais aussi et surtout à Franck Albaret et Robert Chardon toujours présents et disponibles, respectivement pour mes problèmes de photos et la recherche d'illustrations originales, même à la dernière minute ce qui n'est pas le plus facile ! ●

Contact

Gilles THOMAS

Technicien à la Mairie de Paris
gilles.thomas@paris.fr

Bibliographie

"Topographie souterraine", de Robert Taton (né en 1903, professeur de topographie à l'École Nationale Supérieure des Mines à partir de 1945, à l'École Supérieure de Géomètres et Topographes, et à l'Institut de Topométrie du CNAM), édité par Eyrolles en 1960 ;
"Les entrailles de Paris", par le professeur R. TATON (p. 19-29) in "Géomètre" (octobre 1973). Plus particulièrement l'anecdote "La nuit la plus longue" pages

26 et 27 de cet article ;

Plaquette de l'Inspection des carrières, diffusée pour les 200 ans du service (1977) ;

"Catacombes et Carrières de Paris ; promenade sous la capitale", par René Suttel (édité en 1986 par la SEHDACS, puis en 1993 par le PICAR) ;

"On Station, a complete handbook for surveying and mapping caves", par George R. Dasher (publié par la National Speleological Society 1992) ;

"Souterrains et carrières d'Annet-sur-Marne", par Joëlle et Patrick Pallu (© DMI édition 1995) ;

Plaquette de l'Inspection des carrières, diffusée pour les 220 ans du service (1997) ;

"Atlas du Paris souterrain", ouvrage collectif sous la coordination de Alain Clément et Gilles Thomas © Parigramme 2001 ;

"Le dessin d'une topographie", pp 12-15 paru dans "Spéléoscope" n°20 (Mai 2002) Feuille de liaison et d'information de la commission scientifique et de la commission environnement de la fédération française de spéléologie ;

"Le fond", n°4 (année 2005), bulletin de l'Association Parisienne de Recherche Spéléologique (circa 200 pages) (cf. son dossier "Explorations et topographies") ;
Interview de Arnaud Grévoze, responsable de la Sûreté nucléaire pour le site de la Manche, le 1^{er} février 2006 sur France Inter (émission matinale "Le Sept - Neuf").

Voir aussi les sites Internet :

<http://www.explographies.com> (Cube)
et <http://geos1777.free.fr>

ABSTRACT

Cataphiles - urban explorers impassioned by the Paris underground - have borrowed the official maps made by the surveyors of the General Inspection of the Quarries and created new and far more comprehensive versions that are much more suited to their underground wanderings. They are so accurate and practical, they're even said to be used by the authorities! These maps can be found on the net, free of charge. And today, Urban Explorers come from all over the world to visit "the real Paris catacombs", from Europe and the U.S., as well as from the farthest reaches, including the ex-Soviet Union and the Australian antipodes!

Le cadastre espagnol : mise en place, utilisations et limites

■ Hélène TESSON

En Espagne, comme dans beaucoup de pays européens, le cadastre a une origine romaine. Mais c'est vraiment au XVIII^e siècle, avec l'affirmation de la monarchie absolue, que le pouvoir royal va recenser systématiquement les propriétés de ses sujets et imposer des charges fiscales sur la terre afin de subvenir aux besoins et aux dépenses de la couronne. Cela se traduit dès 1715 par la réalisation du cadastre de Patio pour la Catalogne puis en 1749 par celle du cadastre de Ensenada pour le reste de l'Espagne.

Ce cadastre a été le premier essai sérieux pour établir un système équitable de répartition des charges fiscales en fonction de la richesse foncière. Il se voulait l'instrument-clé de l'égalité fiscale. Puis tout au long du XIX^e siècle l'histoire du cadastre a été marquée par un long processus de lutte de l'Etat pour permettre sa conservation. C'était une entreprise véritablement colossale mais elle n'a guère eu d'impact car elle s'est heurtée aux forces politiques les plus conservatrices qui défendaient l'intérêt d'une élite possédant la terre : les "terratenientes" (littéralement : "qui possèdent la terre"). L'objectif de la monarchie était de parvenir à un cadastre juste et équitable dans la répartition de l'impôt ceci afin d'en terminer avec la fraude fiscale des gros propriétaires terriens qui s'exerçait, de fait, aux dépens des petits agriculteurs, mais le gouvernement manquait des moyens nécessaires pour envoyer des agents de l'administration mesurer les parcelles, attribuer une qualité, donc une valeur aux terrains...

Face à cette situation, en 1845 le ministre des finances A. Mon met en place une réforme qui s'appuie sur le "modèle" fiscal français. Elle aboutit à un premier recensement de la richesse, premier pas vers la création d'un nouveau cadastre. Cette réforme s'est heurtée, de nouveau, aux groupes les plus conservateurs qui ont fait en sorte que le nouveau cadastre ne soit pas mené à terme. En ses lieux et places, il a été créé les "amillaramientos"¹. Ils consistaient en des déclarations effectuées par les propriétaires eux-mêmes, sur lesquelles étaient inscrites la superficie, l'utilisation et la valeur du terrain. La fraude était systématique. De telle sorte qu'il y avait une perte massive de l'information cadastrale. Cette fraude solidement installée en Espagne engendrera par ailleurs une "idéologie de tolérance" de l'administration pour ceux qui cherchaient à échapper à l'impôt foncier en cachant l'existence de leurs



Source : Archivo Historico de Toledo.

Plan de la ville de Olias del Rey (Toledo). Catastro de Ensenada 1751.

propriétés au ministère des finances². Puis dans le dernier tiers du XIX^e siècle, à mesure que la connaissance cartographique du territoire s'est améliorée, il n'a plus été possible de frauder sur la superficie, mais les propriétaires terriens ont pu continuer à dissimuler au fisc la valeur des terrains.

En 1906 une nouvelle loi sur le cadastre³ a été promulguée. Elle résulte d'un accord politique entre conservateurs et libéraux. Elle constitue l'antécédent le plus immédiat des normes actuelles. Ainsi l'Espagne se dote au début du XX^e siècle, d'un système cadastral comparable à ceux du reste de l'Europe. Cependant, les mêmes problèmes perdurent : une opposition des "terratenientes" pourtant proche des gouvernements, un manque d'instruments techniques opérationnels et une administration débordée. Ce qui ne permettait pas d'actualiser raisonnablement les données cadastrales.

Par ailleurs, la loi de 1906 avait réparti les travaux cadastraux entre l'Institut de Géographie et de Statistique et le Ministère des Finances. Mais l'IGS sous le contrôle de l'armée avait d'autres priorités que de réaliser des relevés au bénéfice du ministère des finances⁴. Malgré cette nouvelle réforme, le

- (1) Les amillaramientos resteront en usage jusqu'à la création de la grande loi du sol de 1956.
- (2) Cette idée a longtemps persisté : ce n'est qu'en 1997 que la loi étatique fait l'obligation de déclarer ses propriétés au cadastre avant tout enregistrement au registre de la propriété.
- (3) Deux phases d'élaboration furent établies : - "l'Avance Cadastre", c'est-à-dire une mesure physique des villages et des masses de cultures uniformes, à partir de croquis à main levée des parcelles de propriétés, - un Cadastre topographique précis du parcellaire.
- (4) Cependant, une grande partie du cadastre rural fut dressée avant 1924. Les travaux continueront entre 1940 et 1959 en particulier grâce à l'emploi de la photographie aérienne. "El Avance catastral" est terminé en 1950.

■ ■ ■ nombre de "non-déclarations" a continué à être très élevé. Ce qui relativise, à cette époque, la valeur du cadastre espagnol. Il faut attendre 1964 pour que la compétence du cadastre soit attribuée en totalité au ministère des finances. Celui-ci va développer entre 1965 et 1974 une politique visant à créer une base de données fiables, baptisée : "Implantation du régime Cadastral".

Le ministère commença par ordonner la réalisation d'une nouvelle série de photographies aériennes du territoire (dans l'idée de récupérer l'impôt dérivé du cadastre). Seulement, faute de moyens techniques et financiers, à l'égal de ces prédécesseurs, ce cadastre est devenu très vite obsolète. Ainsi, sous le régime Franquiste, l'impôt direct sur le foncier n'existait pas puisque aucun outil ne permettait son prélèvement. Et jusque dans les années 1980, le cadastre n'avait donc guère de valeur.

En 1982 le gouvernement estime que la réalisation d'un cadastre moderne est indispensable. Il veut en faire un outil performant dont la durée de vie soit plus importante que celle de ses prédécesseurs. Il cherche à mettre en place un cadastre qui recouvrirait "officiellement" plusieurs usages et qui ne soit pas uniquement l'instrument du prélèvement de l'impôt foncier⁵. Entre 1988 et 1998 l'Etat réalise alors une énorme campagne médiatique. Il promeut cet outil dans les revues tel que "Catastro"⁶ qui insiste sur la modernité du "cadastre" mit à disposition des municipalités : *"outil qui par excellence contrôle le mieux le foncier et qui se doit d'être un instrument d'aide à la planification, à la pratique des planificateurs et à la population."* D'importants moyens financiers pour la revalorisation du cadastre sont alors dégagés de façon à assurer sa réalisation, sa gestion et sa conservation. C'est une véritable refonte qui est alors mise en place. Pour ce faire, mais également pour aller dans l'esprit de la nouvelle Constitution, le cadastre est doté *"de moyens informatiques adéquats qui garantissent la même information cadastrale à tous, sur tout le territoire."*

Les travaux cadastraux s'étendront sur deux périodes : les années de 1982 à 1990 ont été consacrées à la création de la base de données avec la mise au point du Système d'Information Cadastral (SIC) qui incorpore de manière massive l'information. Puis depuis 1990 on est entré dans la période dite "de consolidation" qui se caractérise par une actualisation permanente des données cadastrales.⁷ Dépendant du Ministère de l'Economie et des Finances, le cadastre est depuis élaboré selon un modèle centralisé. Mais dans la pratique sa réalisation comme sa conservation sont très fortement délocalisées puisqu'elles s'opèrent à l'échelon communal, ne serait-ce que parce que le cadastre permet le calcul de l'impôt foncier qui est un impôt municipal.



Extrait d'un plan cadastral.

Il n'en reste pas moins que c'est le Ministère de l'Economie et des Finances à travers la direction générale du centre de gestion cadastrale et de prélèvement de l'impôt qui a établi un réseau de 16 bureaux régionaux, lesquels doivent coordonner les travaux réalisés par les 65 directions territoriales⁸. Ces directions jouent le rôle de "centres de production et de conservation" du cadastre : *"elles développent leurs activités avec les mêmes paramètres, utilisent les mêmes outils et se doivent d'obtenir les mêmes niveaux de qualité"*. C'est ainsi que l'Etat cherche à garantir l'homogénéité des données et l'égalité des droits sur l'ensemble du territoire. Par ailleurs l'Etat a souscrit des accords avec les cabinets de notaires, pour que toutes les transactions immobilières soient communiquées directement au cadastre. L'objectif est double : dispenser les acheteurs de l'obligation de déclarer leur acquisition et actualiser en permanence le cadastre en identifiant les biens. L'élaboration dans un temps court, les moyens mis en œuvre, l'unité de conception font que le cadastre espagnol⁹ a un contenu identique dans chacune des 17 Communautés Autonomes du pays.

(5) Cet impôt, vu la "non-déclaration" des propriétés au cadastre était quasi - inexistant.

(6) CATASTRO, revue de la Direction Générale du centre de gestion cadastral et de l'impôt, Ministère de l'économie et des finances. Premier numéro : Juin 1989. Périodicité variable, actuellement 32 numéros sont parus.

(7) Il s'agit de permettre la mise à jour du cadastre et de gérer une information sans cesse modifiée, deux outils informatiques ont été créés 1°) un système d'information géographique spécialement créé pour les techniciens du cadastre. Il s'agit du SIGACA (système d'information géographique cadastrale).

2°) - un système spécifique pour la gestion de l'information, conçu pour réaliser la capture, le maintien et l'exploitation des données. Il s'agit du SIECA (système d'information et de gestion cadastral) ; Ces deux systèmes sont bien évidemment référencés à la base cartographique. De plus, il a été mis en place un système d'interconnexion entre les différentes administrations. L'objectif est de transmettre les informations dans les deux sens à des fins de contrôle des données.

(8) "Gérances territoriales" c'est-à-dire une par province (l'équivalent d'un département). Elles sont responsables de la gestion du cadastre.

(9) Attention, on distingue en Espagne deux cadastres : un cadastre rural et un cadastre urbain.

Contenu des pochettes cadastrales

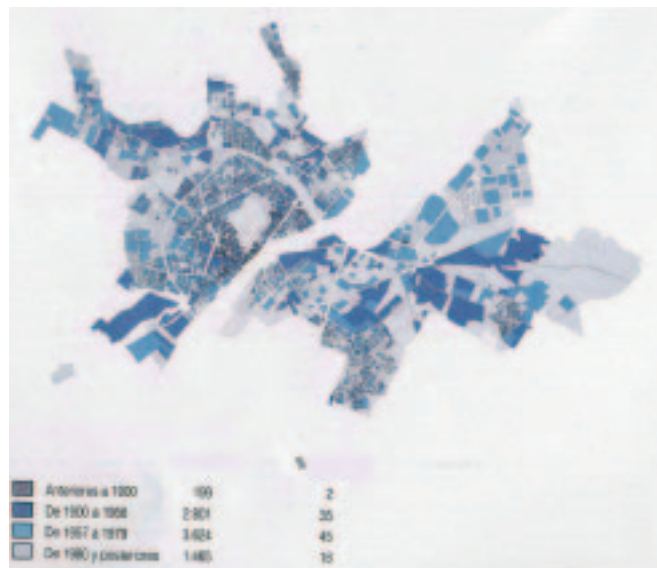
Concrètement le cadastre urbain est composé d'un jeu de cartes couvrant les différentes parties du territoire communal. Il y a un tableau d'assemblage et des plans par section où toutes les parcelles et où tous les immeubles sont représentés. Sur cette base cartographique est calqué un système d'information géographique qui comprend deux documents :

- Une pochette cadastrale pour chaque bien immobilier. Elle est établie par propriété. Cette pochette contient trois fiches :
 - La fiche CU-1 regroupe toute "l'information graphique" : extrait du plan général, croquis côté, photographie de la façade de l'immeuble...
 - La fiche CU-2 recense les "caractéristiques techniques" de la propriété ; superficie de la parcelle, superficie construite de l'immeuble et s'il y a lieu de chacun des logements, date de construction...
 - La fiche CU-3 donne les renseignements relatifs aux "caractéristiques juridiques et économiques" du bien cadastré : nom du propriétaire, domicile fiscal, tantième...
- Une feuille de calcul qui explique, en détail, la manière dont la valeur cadastrale a été obtenue. Celle-ci est une valeur administrative déterminée par les "gérances territoriales" à partir de critères préalablement définis et appliqués de façon homogène. Elle prend en compte les données cadastrales proprement dites (superficie...etc.) et une évaluation du prix du sol auquel on ajoute s'il y a lieu le prix des constructions. La valeur cadastrale ainsi calculée est différente du prix du marché puisqu'elle est le fruit d'une appréciation administrative. Néanmoins, elle garde une relation avec le jeu de l'offre et de la demande dans la mesure où elle ne peut être supérieure aux prix pratiqués dans le voisinage pour un même bien.

La finalité principale du cadastre est bien évidemment l'obtention d'une base fiable pouvant servir au calcul des impôts sur le patrimoine, foncier et immobilier, sur les plus-values, sur le revenu des personnes physiques et sur les sociétés dans leurs composantes immobilières. Le cadastre espagnol sert, directement ou indirectement à six impôts : au niveau communal, l'impôt sur les biens immobiliers (taxe foncière) et l'impôt sur les plus-values ; au niveau régional, l'impôt sur les transactions immobilières et l'impôt sur les successions et donations ; au niveau étatique l'impôt sur le revenu des personnes physiques et l'impôt sur le patrimoine (fortune).

Depuis les années 90, sans perdre de vue son objectif fiscal, l'Etat a cherché à orienter le cadastre vers d'autres finalités. Ainsi, la valeur cadastrale peut être utilisée par les administrations lorsque des terrains ou des immeubles doivent faire l'objet d'une évaluation, comme lors d'une expropriation pour cause d'utilité publique. Il peut aussi servir à fixer les prix des terrains et des immeubles afin de contenir la spéculation toujours possible lorsqu'une opération urbanistique est planifiée. Dans ce cas, c'est la valeur cadastrale du terrain qui est prise en compte, augmentée d'une estimation de la plus value attendue de son urbanisation.

Le cadastre joue également un rôle important dans la planification urbaine. Il est utilisé comme un outil d'aide à la déci-



Plan représentant l'âge des constructions de Lleida.

sion. En se référant aux publications officielles du Ministère de l'Economie et des Finances, on peut analyser le cas de Lleida en Catalogne où les données cadastrales ont été utilisées dans le cadre de la révision du plan d'aménagement communal. Elles ont permis de réaliser, par exemple pour la partie urbaine, à l'échelle 1/5 000, des cartes thématiques du parcellaire, de la superficie des parcelles, du nombre d'étages, de la densité de construction par îlots, du patrimoine public et de l'usage des terrains. À l'aide des données du cadastre rural, il a été dressé des cartes du relief en courbes de niveaux, du parcellaire rural, de la taille des parcelles, de la taille des exploitations agricoles supérieures à 4 ha, de la végétation et des cultures.

Chaque carte présente une méthodologie particulière en fonction de la structure de l'information utilisée ; Ainsi elles vont de la simple prise en compte de l'information graphique, c'est le cas de la carte représentant les courbes de niveau, aux cartes les plus complexes comme celle de la densité de construction où l'information est croisée avec l'analyse descriptive alphanumérique de bases de données externes.

Il se dégage de l'exemple de Lleida que le contenu des bases de données du cadastre permet, grâce à l'utilisation d'un SIG (Système d'Information Géographique), de rendre opérationnelle l'information territoriale. Ainsi, cette ressource, organisée et traitée de façon adéquate, facilite effectivement une connaissance précise des caractéristiques urbaines de la commune. C'est un cas exemplaire.

Mais si l'on prend d'autres communes, et notamment Salamanque, on sait que les pochettes cadastrales ont été évidemment sollicitées. Le problème est qu'elles reprennent simplement ce qui existait avant 1982. Leur contenu n'est pas renouvelé, puisque par exemple on peut y trouver des immeubles construits en 1954 avec toutes les données d'origine sans qu'aucune actualisation n'ait été réalisée. Quant à l'informatisation des données, elle est bloquée par un

Source : Revista Catastro n° 27 "Planos del Avance del plan general de Lleida".

■ ■ ■ manque de personnel. La réalisation de cartes thématiques ne peut être effective que si les plans cadastraux sont bien référencés... or ce n'est pas le cas. En fait la modernité du cadastre n'est réelle que dans les textes et ce sont toujours quelques cas isolés qui sont mis en avant.

La question n'est pas uniquement d'ordre administratif et budgétaire. Elle touche à un problème de société. Le cadastre ne peut être mis à jour qu'avec la contribution des citoyens. Or ceux-ci ne considèrent pas l'enregistrement cadastral comme essentiel dans leurs transactions. Ils préfèrent se faire inscrire au seul registre de la propriété. Cette démarche simple leur permet d'échapper au prélèvement de l'impôt tout en disposant d'un acte officiel de propriété.

Afin d'y remédier, l'Etat a adopté le 30/12/96 une loi qui rend obligatoire, sur tout document relatif à un changement de propriétaire, l'inscription du numéro cadastral.

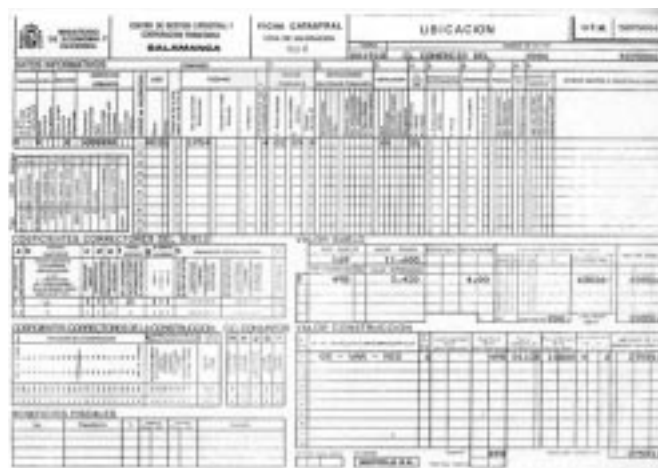
Il s'agit ainsi de faire en sorte que les personnes achetant un bien soient obligées de faire valider, en premier ressort, toute acquisition au service du cadastre. Ce service leur attribue un numéro, avant qu'elles ne se rendent au registre de la propriété. C'est donc une étroite collaboration entre cadastre et registre de la propriété qui a été mise en place (article 53 de la loi du 13/96).

Cette obligation a été exigée le 1^{er} janvier 1997 pour les biens immeubles de nature urbaine. Cette mesure a été pensée comme un instrument de lutte contre les malversations dans le secteur immobilier. Dans ce secteur en effet, les pratiques illégales, leurs incidences dans la société (qui les acceptent comme des habitudes), l'opacité du marché rendaient très difficile la réalisation d'actions destinées à l'éradication de la fraude. Ainsi la référence cadastrale est devenue l'identifiant unique des biens immeubles en déterminant leur nature et leur localisation géographique. L'existence d'un seul et même numéro, aussi bien sur les documents cadastraux que sur tout autre document officiel devrait, permettre selon la loi, d'améliorer considérablement les informations concernant la fiscalité sur le patrimoine immobilier pour toutes les administrations publiques.

Mais d'ors et déjà on peut constater à partir de sondages effectués auprès d'une vingtaine de municipalités ont montré qu'en matière de planification urbaine les documents cadastraux ne sont pas utilisés. Il est vrai que, dans la pratique, l'obtention d'un numéro cadastral ne se fait que lors d'un changement de propriétaire. Par conséquent le patrimoine immobilier qui ne fait pas l'objet d'une transaction échappe à l'actualisation. Il n'est donc pas correctement référencé dans les bases cadastrales. Le cas de Salamanque dont j'ai étudié les cinq planifications successives n'est donc pas un cas isolé¹⁰.

En revanche, la modernisation reste à l'ordre du jour. Depuis 2005 les plans cadastraux des villes espagnoles sont accessibles par Internet : <https://ovc.catastro.meh.es/>. C'est un

moyen extrêmement commode pour appréhender de manière précise la disposition du parcellaire et la hauteur des immeubles mesurée par niveau. À partir de ce document et en le complétant par une enquête systématique de terrain, il est possible de réaliser des études d'urbanisme, voire de proposer des esquisses de projets d'aménagement. ●



Fiche CU-2 d'une pochette cadastrale.

Bibliographie

GALLEGO VICTORIA M. *Análisis y valoración del patrimonio inmobiliario urbano de España*. Madrid, Dirección general del centro de gestión catastral y cooperación tributaria, 1995, 201p.

MINISTERIO DE ECONOMIA Y HACIENDA *Catastro y registro de la propiedad*, Madrid, Revista Catastro, numero especial, n°16, Abril 1993, 96p.

MINISTERIO DE ECONOMIA Y HACIENDA *Dimensión internacional del catastro*, Madrid, Revista Catastro, numero especial, n°28, 1996, 115p.

MINISTERIO DE ECONOMIA Y HACIENDA *Suelo, Urbanismo y Catastro*, Madrid, Revista Catastro, n°17, juillet 1993, 113p.

MINISTERIO DE ECONOMIA Y HACIENDA *Suelo, Urbanismo y Catastro*, Madrid, Revista Catastro, numero especial sobre el texto refundido de la ley del suelo, n°29-30, 78p

MINISTERIO DE ECONOMIA Y HACIENDA, *El catastro en Europa*. gestión 1992-1993, consejería de política, 1994

PRO J. Estado, *geometría y propiedad*. Los orígenes del catastro en España. Madrid, Ministerio de economía y hacienda, 1992, 419p.

Contact

Hélène TESSON
16 passage Thiéré
75011 Paris
helenetesson@yahoo.fr

(10) H.Tesson, "Planification et paysages urbains à Salamanque (Espagne)", thèse de doctorat nouveau régime, Université de Paris I, septembre 2005.

Le barrage d'Inga.

Pots de vins et peaux de banane

■ Robert CHEVALIER

Je voudrais de nouveau, montrer à travers quelques anecdotes, les conditions dans lesquelles se font les opérations de reconnaissance topographique, dans les pays dits à problèmes. Il s'agit cette fois du Zaïre (ex Congo belge) qui porte maintenant le nom de "république démocratique du Congo" à ne pas confondre avec le Congo (république populaire et ex Congo français)

Dans les années 1985, un appel d'offres pour un marché d'études est lancé par EDF International agissant en tant qu'Ingénieur-conseil pour le compte de la SNEL (EDF zaïrois). En cas de succès, une collaboration avec EDF ne peut que nous rassurer, cette entreprise étant un de nos clients habituels et française de surcroît, ce qui n'est pas toujours le cas. Il s'agit d'un projet de ligne 380 000 volts reliant le barrage d'Inga à la capitale Kinshasa, soit environ 300 km à travers une région qui ne pouvait être que de la forêt, de la brousse ou de la savane, types de végétation propres à l'Afrique subsaharienne.

Il faut évidemment se rendre sur place pour s'en assurer et recueillir un maximum de renseignements administratifs, fiscaux, financiers... propres au pays, ainsi que ceux relatifs à la logistique et aux conditions de vie locales et bien sûr aux difficultés topographiques sur le terrain.

Par chance, j'apprends qu'une des filiales de notre groupe est implantée au Zaïre dans le domaine de l'adduction d'eau. Enorme avantage, grâce à la possibilité d'obtenir des informations sur le pays de source sûre et fiable.

Par échange de télex (en ce temps là, pas d'email, ni même de fax) je m'entends sur un rendez-vous à l'aéroport de Kinshasa avec le patron de l'entreprise, ce qui est plutôt rassurant (en Afrique j'appréhende toujours le premier contact).

Envol pour le Zaïre, arrivée tardive et de nuit. Après de longues formalités de police et de douane, laborieuses et tatillonnes, comme à l'accoutumée, je cherche du regard notre correspondant, mais il n'est pas au point de rendez-vous. Je sors donc de l'aéroport en entreprenant de traverser une foule grouillante et compacte. Il faut se frayer laborieusement un passage à travers cette marée humaine. Des dizaines de mains m'agrippent et on m'interpelle : "Patron, je te porte ta valise? Patron, tu veux un taxi?" Dieu merci, je repère enfin l'homme que je cherchais, alors que j'allais me rabattre sur cette solution.

Heureusement, que je ne l'ai pas fait, car celui-ci me raconte que de nombreux voyageurs qui avaient pris de prétendus taxis se sont retrouvés dans les faubourgs de la ville, complètement dépouillés. Ça promet !

Sur la route aéroport-hôtel, un barrage de police bloque la route. A ma grande surprise, mon compagnon fonce dedans en accélérant. Les policiers se jettent sur le côté et en me retournant je vois qu'ils nous mettent en joue. Petite inquiétude, mais mon collègue éclate de rire en me disant : "Ne craignez rien, ils n'ont pas de munitions ! Ah bon ? Mais non, ils les vendent pour se faire de l'argent !..." Coup de bluff ! Dès les jours suivants, je me livre à différentes visites pour compléter ou étayer les renseignements fournis par cette société locale. Dans certaines administrations je tombe sur des fonctionnaires en train de faire la sieste sur leur bureau, ou bien me faisant comprendre que toute peine mérite salaire... Je réalise rapidement que comme dans le plupart des pays du tiers monde, le bakchich est roi.

Un exemple, à l'IGN local, je veux acquérir des photos aériennes. On me laisse entendre que sans facture, c'est mieux. En sortant, je regarde les photos et je vois au dos : "document d'archives"... Tant pis pour ceux qui passeront après.

On pourrait penser que beaucoup d'informations pourraient être obtenues par téléphone. Que nenni, celui-ci ne fonctionne pratiquement pas (comme le reste). Il est plus efficace de faire un saut en voiture en essayant de s'y retrouver dans cette ville

très étendue, avec des adresses hypothétiques du genre : *"derrière le château d'eau ou à côté de la station Shell, dans tel quartier"*. Devant ces difficultés, je me rabats sur la solution taxi (de vrais taxis, comme on en trouve devant les hôtels internationaux) mais parfois, par souci d'indépendance, je reprends une voiture de société. Alors les ennuis commencent avec les policiers qui repèrent de loin les conducteurs blancs et s'arrangent pour les pousser à la faute (réelle ou inventée). Je me souviens m'être engagé en toute bonne foi dans un sens interdit, sans panneau (il fallait deviner). Un policier me court après en s'époumonant dans son sifflet. Ma tentative de fuite tourne court lorsque je suis bloqué par les voitures venant en sens inverse. Le policier jubile, il monte à bord de la voiture, pose son fusil sur la banquette arrière et commence alors à l'abri des regards, une longue négociation sur le montant de l'amende, je veux dire du bakchich... Je pense que je paie pour tous ceux qui ont eu plus de chance que moi.

Cependant, ces interpellations diurnes ne sont rien (trop de témoins) à côté de ce qui se passe la nuit. Souvent le soir, je suis en repas d'affaire, parfois dans des restaurants situés loin de mon hôtel. Au retour, nombreux, très nombreux barrages de police. Malgré les incitations des européens que j'ai rencontrés, je ne peux me résoudre à leur foncer dedans. A chaque fois, même cérémonial : les gendarmes, en nombre, encerclent ma voiture avec des airs menaçants. Il faut préciser que ces gendarmes zaïrois n'ont rien de commun avec les nôtres : tenue léopard, casque lourd, armement à la Rambo, plutôt impressionnants. On vous fait sortir de l'auto, mains sur le capot, vociférations en tous genre. En général, menace d'être emmené au poste ou pire en prison pour une infraction totalement imaginaire. Avec mon sens de la diplomatie, je demande faussement : *"Peut-on régler l'amende sur le champ ?"*. C'est ce qu'ils attendaient. Ensuite et toujours, car il ne faut pas perdre la face, discussion de marchands de tapis autour du montant de la "rançon".

Puis une fois que tout est réglé, tout ce beau monde se détend, blague et rigole. Comme je demande : *"Tu n'as pas honte d'agir ainsi ?"* on me répond : *"Il y a six mois qu'on ne touche pas notre paie, il faut bien se débrouiller pour nourrir sa famille"*. Je pense qu'on leur donne vraisemblablement quartier libre pour pratiquer ce genre de racket en guise de salaire.



Alternance de forêt dégradée et de savane sur le tracé.



Mieux vaut un bon 4 x 4...

Passons, mais le problème est que quelques kilomètres plus loin, nouvelle patrouille dont on ne connaît pas à l'avance le comportement, nouvelles palabres. Parfois trois fois sur un parcours de dix kilomètres et à chaque fois une demi-heure de perdue. Je pars ensuite avec soulagement pour la reconnaissance sur le terrain, car je sais bien qu'autant les villes africaines sont de vrais guet-apens, autant en brousse les populations sont accueillantes et serviables.

Malheureusement, pas de 4 x 4 disponible à emprunter ou à louer. On me confie une camionnette Peugeot 404 faute de mieux, avec un accompagnateur chauffeur assistant interprète zaïrois. En tout cas, ça fait de la compagnie ! Avec ce véhicule, ça ne se passe pas trop mal, avec quelques enlissements, habituels dans ces pays. Heureusement, à chaque fois, même si on a l'impression d'être seul dans l'immensité de la savane, on voit arriver rapidement une multitude d'indigènes qui se font un plaisir de vous pousser, de vous tirer et vous remettre sur un sol sec, tout au moins provisoirement.

Souvent, en contre partie, certains vous demandent de monter dans la voiture, ce qui ne se refuse évidemment pas.

Dans ce cas de figure, un jour, j'entends à l'arrière une conversation animée entre les auto-stoppeurs, en dialecte local. Mon compagnon zaïrois me dit qu'ils pensent que je suis le nouveau missionnaire, ce qui me fait sourire. Mais arrivés au prochain village, nous découvrons une foule massée de chaque côté de la piste qui chante en tapant dans ses mains, en me faisant une ovation. Au risque de les décevoir, j'accélère lâchement pour nous éloigner au plus vite, par crainte qu'ils ne me demandent de dire la messe. Comment ont-ils été prévenus ? Peut-être le mystère du téléphone arabe ou plutôt africain, ou sans doute un vrai missionnaire était-il effectivement attendu ? Une autre fois, à l'aéroport, un militaire respectueux et la casquette à la main me demandera si je suis bien le nouvel évêque, j'ai connu aussi la même situation à la Réunion. Décidément, j'aurais du entrer dans les ordres !

Pendant ce voyage, nous logeons à M'Banza N'Gungu, petite ville à mi-parcours du tracé, dans l'unique hôtel minable et délabré. Comme de juste, arrivée d'eau incertaine et de couleur latérite, innombrables insectes, volants et rampants, un scolopendre dans le lavabo, des margouillats partout, (sorte de lézard possédant des ventouses sous les pattes, leur permettant de marcher au plafond), malheureusement il arrive que ça n'adhère pas bien et qu'on en

prenne un dans la figure ou dans le col de la chemise. En passant près du marché, très coloré, je veux faire des photos. Mon compagnon mort de peur m'en dissuade fermement, car il y a des militaires armés un peu partout. Il semble que tout soit secret défense, on se demande bien pourquoi ? C'est une situation qu'on rencontre en tous lieux, sauf en pleine brousse bien sur, et prudence, car les délateurs sont nombreux, soit par civisme soit pour se faire bien voir du pouvoir résolument totalitaire.

Durant ce périple, je suis obligé d'emporter de l'argent local (zaïres) pour régler les dépenses courantes. A cette époque, le cours de cette monnaie était si faible qu'il fallait un grand sac reporter plein de petites coupures pour avoir l'équivalent disons de cinq cents FF. A chaque règlement, il fallait puiser discrètement dans celui-ci sous le regard avide des commerçants et de la foule environnante.

Au barrage d'Inga, impossible de pénétrer. C'est gardé militairement (objectif stratégique) et à ce stade de l'affaire, je n'ai aucune autorisation ou droit à faire valoir. Par ailleurs, les cinquante derniers kilomètres du tracé sont couverts de forêt impénétrable et sans aucun accès autre que pédestre.

De retour à Kinshasa, j'envisage comme souvent, de trouver un pilote qui voudrait bien me faire survoler cette zone. Je fais le tour des aéro-clubs (solution économique) mais personne ne peut ou ne veut me transporter. Je note l'air embarrassé des gens, mais je comprends mieux lorsque je décide de faire appel à une société de transport aérien (solution pourtant très coûteuse) où l'on me dit que sans autorisation officielle, il est hors de question de survoler le site d'INGA, protégé paraît-il par des batteries de DCA et des tireurs à la gâchette facile.

Je me résoudrai donc à observer cette zone au stéréoscope, sur les photos aériennes acquises indûment.

A l'issue de cette mission, de retour au siège j'établis mon devis et nous remettons notre proposition. Victoire, nous sommes les moins disants et donc retenus. Ce qui n'empêchera pas de longues négociations avec l'Ingénieur-conseil qui veut tout décortiquer. C'est un beau marché de l'ordre de cinq millions de FF et le début pour moi de nombreux allers-retours au Zaïre.



Route nationale zaïroise...

Plus tard, avec deux ingénieurs EDF en charge de l'affaire, nous nous y rendons pour examiner au sol le projet de tracé que j'avais envisagé et le soumettre au client.

Cette fois, bien équipé côté véhicule, et fort de mon expérience précédente, nous parcourons la zone dans des conditions acceptables. A Inga, ça se présente beaucoup mieux. Grâce à une autorisation de la SNEL, qui n'empêche pas les palabres interminables et le versement aux militaires des inévitables bakchichs, nous pouvons enfin pénétrer sur le site. Mais on ne se ballade pas comme ça en zone stratégique ! On nous impose d'être accompagné par quelqu'un du parti au pouvoir, et nous voyons arriver une citoyenne (c'est comme ça qu'on s'appelle là-bas) bien grassouillette, en boubou mou-lant et talons hauts, qui doit nous accompagner partout (risques d'espionnage, sans doute).

La pauvre femme, ruisselante de sueur, ne se doutait pas que nous irions dans les endroits les plus inaccessibles pour repérer les emplacements possibles pour l'implantation des pylônes destinés à assurer la traversée du fleuve. Passages dans des broussailles touffues (quelques serpents au passage) escalade de rochers au bord du lit du Zaïre, elle n'était vraiment pas équipée pour ça et à du nous maudire copieusement. Nous n'y mettions pourtant aucune malice, préoccupés seulement par l'accomplissement de notre travail.

De retour à Kinshasa, rendez-vous avec l'état major de la SNEL pour présenter l'avant projet dans son ensemble, sur une carte au 1/100 000, faute de mieux. Nous attendons très longtemps comme il se doit et nous pénétrons enfin dans un bureau où se tient un aréopage d'une demi-douzaine de responsables, sous la houlette du PDG (tous zaïrois, bien sur). Je ressens comme un malaise et le sentiment désagréable de passer au tribunal.

Sur un ton péremptoire, le président me dit : *"Citoyen entrepreneur ; exposez-nous votre projet"*

Il faut savoir qu'une étude de faisabilité avait déjà été menée par un bureau d'ingénierie italien, qui préconisait un tracé totalement rectiligne, parallèle à un ouvrage existant. Celui-ci avait été réalisé par les américains, selon ce qu'on appelle dans notre métier "la méthode du légionnaire".

Toujours tout droit et fi des obstacles !

J'avais osé penser, en contradiction complète avec ce concept, qu'un tracé à la française prenant en compte les contraintes géographiques, géologiques et humaines serait préférable ; en outre plus proche de l'unique route reliant Kinshasa à Inga, facilitant ainsi les travaux de construction et surtout d'exploitation ultérieure. Je me sentais dans mes petits souliers, par crainte de bousculer les idées acquises et qui plus est, un peu impressionné par ce directoire inquisiteur. Par chance, j'avais un joker : lors de mes pérégrinations passées, j'avais appris un peu par hasard et confidentiellement, que le président de la république du Zaïre, sans doute bien conseillé et désireux de laisser une image de bâtisseur, avait décrété que tous les ouvrages linéaires de ce secteur (route, voie ferrée, transport d'énergie) seraient grossièrement réunis dans un couloir unique, regroupant ainsi les facilités d'intervention pour entretien.

Alors que ces messieurs semblent perplexes quant au choix entre les deux propositions, d'autant plus qu'ils ne paraissent guère compétents, j'assène d'un coup mon information secrète et annonce d'une voix ferme et assurée : *"comme l'a souhaité le citoyen maréchal président, l'idée d'un couloir regroupant les ouvrages ...etc."*

L'impact est immédiat auprès de ces gens inféodés au pouvoir sans partage de l'autorité suprême. Je pense qu'ils ne l'ignoraient pas, mais c'était un bon électrochoc. Du coup, c'est gagné, assentiment général, validation de l'avant projet. Ce que je ne dis pas, c'est que ça nous arrange bien au niveau logistique, car j'ai toujours à l'esprit le sort des géomètres qui crapahuteront sur le terrain.

Suite à ce feu vert, je peux programmer et mettre en place l'intervention de ceux-ci. Les travaux sur le terrain incluent le balisage des points d'angles déterminant les alignements, le piquetage de ceux-ci assorti d'un layonnage indispensable et extrêmement difficile dans ce genre de végétation, puis le relevé du profil en long, au distancemètre indépendant du théodolite, pour parer aux pannes électroniques, sans oublier des sondages au pénétromètre.

Vu l'ampleur du projet, on met en œuvre de gros moyens : huit géomètres, quatre pick-up 4 x 4, des dizaines d'aides indigènes. Les données des levés seront saisies sur un carnet électronique, le top à l'époque et traitées chaque soir sur un ordinateur portable rudimentaire (c'était le début de l'informatique de terrain). Ensuite les disquettes seront transmises non par la poste (trop aléatoire) mais par des équipages de compagnies aériennes (moyennant gratification) avec remise en mains propres à l'arrivée. Il faut rappeler les difficultés d'importation des véhicules et du matériel. Trois des 4 pick-up importés de France sont restés bloqués deux mois au service des douanes du port de Matadi, bien que tout soit en règle, heureusement avant l'arrivée des géomètres. La société locale envoyait quelqu'un toutes les semaines pour essayer de régler la question à grand renfort de pots de vin, mais, à chaque fois c'était un fonctionnaire différent... Quant au matériel topo qui voyageait en bagage accompagné, un douanier pointilleux voulut démonter un distancemètre, voyant dans la couleur kaki propre à une célèbre marque suisse, le signe d'un usage militaire... Cette phase de travaux de loin la plus importante ne sera pas



Brigade topo sur un pont de lianes.



Sondages au pénétromètre avec un singe en prime...

racontée ici, car à elle seule, elle justifierait un article ou même un livre.

Heureusement, la partie administrative et comptable est assurée par nos confrères locaux, ce qui confirme l'intérêt de ce genre de partenariat, toutes les fois que c'est possible.

Ultérieurement, un autre voyage est lié à la visite d'un haut responsable EDF, désireux sans doute de se dépayser. Afin de dérouler le tapis rouge, je me rends de nouveau au Zaïre. Par chance nous obtenons la possibilité d'utiliser l'hélicoptère (et son pilote) des américains qui assuraient la maintenance de l'ouvrage qu'ils avaient construit. De là-haut tout semble facile ! Nous parcourons le tracé à basse altitude et pouvons enfin voir la partie inaccessible de celui-ci, que j'avais prudemment sous traitée (sous contrôle) à un bureau d'étude zairois, dont les employés ne rechignaient pas à bivouaquer dans la forêt et à se nourrir du produit de leur chasse. Puis survol du site du barrage et des rapides d'Inga où le malheureux Philippe de Dieuleveut a trouvé la mort dans des circonstances mal élucidées, mais parfaitement subodorées par tout le monde sur place !

Retour à Kinshasa, le grand chef blanc veut connaître "l'aventure". Je l'emmène en 4 x 4 pour une demi-journée en brousse par les pistes les plus défoncées, afin qu'il se rende un peu compte de ce qu'est l'Afrique, en tout cas autrement que vue du ciel !

Comme je lui propose de faire des photos dans les villages, il me dit qu'il préfère les prendre par la fenêtre de la voiture en roulant. Je pense qu'il avait un peu peur de rencontrer des "sauvages". Ca se confirmera plus tard lorsque je l'emmènerai s'encanailler au "marché aux voleurs" de Kinshasa, peu fréquenté par les blancs. Il marche littéralement dans mes pas, collé contre moi et sans un mot. Je me régale, car le piquant de l'affaire est que cet homme terrorise tout le monde dans son milieu professionnel... Petite revanche bien innocente ! Plus tard, je retourne une nouvelle fois sur place par suite d'un changement d'emplacement du futur poste 380 KV de Kinshasa, ce qui va obliger à reprendre le tracé sur vingt-cinq kilomètres. On me prête un bon 4 x 4 (un vrai, pas de ceux qu'on voit maintenant sur les Champs-Élysées !) pour reconnaître cette variante.

Un jour, sur une piste près d'un village, je vois un militaire galonné qui fait de grands gestes. Ne pouvant y échapper, je le prends en stop. Au bout d'un instant, je le vois sortir un pistolet. Légère angoisse, mais c'est pour me proposer de l'acheter. Je refuse évidemment, car je sais trop que si j'avais accepté,

j'aurais été signalé comme par hasard à la police de l'aéroport qui, lors de mon retour, m'aurait fouillé, l'aurait confisqué, aurait perçu un bakchich pour m'éviter la prison et l'aurait enfin rendu à son propriétaire et complice, qui recommencerait de plus belle après partage des bénéfices.

Situation typiquement zaïroise que l'on rencontre aussi auprès des marchands à la sauvette qui vous abordent dans les rues pour vous proposer des diamants (vrais ou faux) dont l'exportation est interdite. Même scénario, même conclusion.

Dans le domaine des combines, il faut aussi dire qu'il est presque impossible de prendre l'avion de retour sans recourir aux bons offices d'un intermédiaire appelé bizarrement "protocole" qui moyennant finances, se charge grâce à ses relations de l'enregistrement et des formalités de police et de douane, pendant que vous vous prélassiez au bar de l'aéroport. Évidemment, à chaque visite des gens de l'EDF c'est l'entreprise qui se chargeait de régler ce genre de problème. Mais un jour deux ingénieurs EDF voyageant seuls et prenant nos conseils par-dessus la jambe décident de se passer de ce genre d'entremetteur. Naturellement ils se font coincer par la police, se retrouvent à poil au poste, se font délester de tout leur argent et ne sont relâchés qu'au moment où les hauts parleurs annoncent : "Dernier appel avant embarquement." Sans commentaires...

Je profite de ce voyage pour faire un saut à Brazzaville au Congo (sur l'autre rive du fleuve du même nom) afin d'y faire un peu de public relations.

Traversée par le bac automoteur dans un désordre indescriptible, bateau surchargé, bousculades, coups de matraques des militaires. Heureusement bien conseillé, j'ai pris un billet pour la classe "supérieure", ce qui évite un peu la promiscuité, mais pour y arriver quelle aventure ! On m'a suggéré, sans rire, d'attacher ma valise à mon poignet à l'aide d'une chaîne pour éviter le vol à l'arraché...

Au Congo, je ne suis plus citoyen mais camarade. Autre pays, autre régime, autres problèmes...

Pour en finir avec le Zaïre, une ultime anecdote qui m'a fait passer un sale moment.

Un soir en voiture dans la capitale, de retour d'un dîner, au feu rouge (dont les ampoules étaient brisées, mais il faut faire comme si) j'entends cogner au carreau de la portière droite. Je baisse la glace et voit une africaine en sanglots, me disant qu'elle avait loupé le dernier bus et me demandant poliment de la déposer. Bon prince, j'accepte car c'est à peu près mon chemin. Quelle erreur ! Nous voici partis dans les faubourgs qui sont de vrais bidonvilles. Lorsque nous nous arrêtons enfin dans l'obscurité la plus totale, je vois dans la lueur des phares que nous sommes entourés par une foule à l'attitude patibulaire. La demoiselle se met à hurler que j'ai profité de ses charmes et que je ne veux pas la payer ! La populace prend évidemment parti pour elle et cerne la voiture. Ma première réaction est de démarrer en trombe mais la fille, plus rapide, arrache la clé de contact et la lance par-dessus bord. Me voilà dans de beaux draps ! Longue discussion très houleuse, car elle n'exigeait rien moins que 1 000 FF de l'époque.

Je dis que je n'ai presque pas d'argent, ce qui est vrai car je réglais les restaurants par carte bancaire. Je propose d'aller en chercher à l'hôtel ce qui ne marche évidemment pas, même avec quelqu'un qui m'accompagnerait, car ils savent très bien qu'ils auraient des ennuis avec les gens de l'Intercontinental. Aucune solution en vue, ça dure depuis deux heures. Je commence à perdre mon sang-froid. Soudain, il me vient une idée, ça m'arrive parfois ! Je suggère d'aller chercher l'argent en laissant les papiers de la voiture en garantie. Après concertation générale, on accepte ma proposition, on me rend la clé et je file sans demander mon reste, avec la ferme intention de ne pas revenir... Le lendemain, je restitue la voiture, en disant qu'on m'a volé les papiers. On me répond que ce n'est pas grave, que ça arrive tous les jours ! Ouf, la ruse avait marché ! Par contre quand il m'arrivera plus tard de traverser le lieu de mes exploits en taxi (bien plus prudent, j'avais compris) je me recroquevillais sur la banquette arrière pour ne pas risquer d'être reconnu, car j'imaginai la rage rétrospective de mes "ravisseurs".

Ceux qui connaissent bien l'Afrique ne seront pas étonnés de ces avatars un peu stressants. Je dois avouer qu'à chaque fois que je retournais dans ce pays, j'étais passablement énervé et obligé de prendre du Lexomil avant le départ. Parfois, je faisais mon autocritique en me disant que je devais être bien couard pour ressentir de telles émotions, jusqu'au jour où sur un vol de retour Sabena, je me trouve auprès d'un passager belge avec qui j'engage la conversation. Cet homme charmant, comme la plupart des Belges, me dit qu'il travaille à l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) qu'il parcourt le monde pour se rendre dans les pays les plus démunis, donc sujets à problèmes, en un mot quelqu'un qui en voyait de toutes les couleurs.

Au bout d'un moment, il me confie que le seul pays où il se rendait avec appréhension était le Zaïre. (ainsi que le Nigeria je crois) et qu'il prenait lui aussi un anxyolitique durant son séjour. Soulagement, je ne suis pas le seul à ressentir ce genre de malaise. Pour ceux qui ne connaissent pas ou peu ce continent, que ces propos ne les découragent pas. Avec un peu de sang-froid, beaucoup de patience et de sens du contact, plus un zeste d'humour (les africains sont très rieurs) tout s'arrange toujours. Mais il faut bien se couler dans le moule, accepter les usages locaux, même s'ils vous semblent parfois immoraux et surtout ne pas vouloir refaire le monde ni se laisser décourager par les peaux de bananes en tous genres. C'est très vivable ainsi. La preuve, je suis là pour le raconter et beaucoup d'étrangers y vivaient, même très bien à cette époque. On se fait à tout ! Pour être définitivement rassurant, je dois reconnaître qu'il y a rarement de violences physiques (sauf dans les situations séditionnelles) mais beaucoup d'intimidation et de roublardise.

Encore un petit avantage pour nous : au Zaïre on parle français, mais avec l'accent belge !

Si des zaïrois (ou congolais) me lisent j'espère qu'il ne m'en voudront pas, car je garde malgré tout un bon souvenir de leur pays et une réelle sympathie pour ses habitants, qui ne sont bien évidemment pas tous des racketteurs. ●

Palais-Royal : Bury côté

■ Jean-Pierre MAILLARD

A Paris le Palais-Royal est le siège d'institutions vénérables de la République : le Conseil d'Etat dans le palais proprement dit, la Comédie française dans le théâtre, le Conseil constitutionnel et le ministère de la Culture dans les annexes.

Sa cour et son jardin, enserrés dans un écrin de façades parfaitement restaurées, sont un véritable havre de paix, l'espace vert étant ombragé par quatre doubles rangées de tilleuls taillés en marquise.

Les lieux évoquent le cardinal de Richelieu qui a acquis la propriété et a fait bâtir les premières constructions, Louis XIII qui en héritera, Louis XIV qui en fera don à son frère, Philippe d'Orléans, Napoléon qui y installe le Conseil d'Etat et Louis-Philippe qui le réinvestira avant que la Troisième République ne fige l'utilisation d'aujourd'hui. En 1986 cette liste des personnages marquants s'allonge du nom de l'artiste Daniel Buren qui, sur la commande de Jack Lang, installe dans la cour d'honneur un ensemble de colonnes noires et blanches entouré d'un chemin de grillage sous lequel coule de l'eau, composition qui continue à faire couler... beaucoup d'encre.

La présence du ministère de la Culture et de la communication prédispose donc l'ensemble architectural à servir d'écrin à des manifestations publiques et induit diverses initiatives. D'autres créateurs contemporains peuvent être ainsi à l'honneur dans ce bel endroit, de façon permanente ou temporaire.

Les fontaines à boules de Pol Bury

En acier inoxydable, les deux compositions de Pol Bury sont constituées de sphères lentement mobiles, chacune marquée d'un diamètre largement rainuré. Installées à demeure en 1985, ces

boules sont posées sur un large plateau polygonal et assurent une fonction de fontaines. Elles sont bien groupées et perçues comme uniformes bien que les volumes soient inégaux. Présentées de la sorte, on pourrait presque les voir comme deux natures mortes qui ont la particularité de ...bouger.

La rondeur de chaque élément est agréable à l'œil également attiré par la fonction miroir convexe de chacune des boules. C'est alors une autre vision de l'architecture environnante qui est proposée au promeneur ou au visiteur.

Pol Bury

Pol Bury, né en 1922 à Haine-Saint-Pierre en Belgique, suit les cours des Beaux-Arts de Mons. Il arrive à Paris en 1939 où il devient proche du groupe surréaliste.

En 1953, après avoir expérimenté la peinture, il l'abandonne pour mener une réflexion sur le mouvement à travers des sculptures actionnées de manière très lente par le biais de moteurs. Son langage est fait de boules, d'aimants, de cylindres... Il est l'un des acteurs de l'Art cinétique et participe également au mouvement de l'Op Art. Fonctionnant à l'énergie hydraulique ses fontaines sont connues dans le monde entier et, depuis 1976, constituent son mode d'expression privilégié. Qu'elles soient à tubes ou à bulles, en acier, en cuivre ou en une autre matière, les fontaines de Bury révèlent le génie créateur de l'artiste comme son imagination technique et mathématique.

Ces dernières années, tout en poursuivant son travail sur la forme et le mouvement, il a mené une réflexion sur le carré à travers plusieurs médiums.

Il est décédé en octobre 2005 à Paris.



Jean-Pierre Maillard

cour, Honegger au jardin



© Galerie Denise René

Seize réalisations de Gottfried Honegger

Le 22 juin 2006, l'actuel ministre de la Culture, Renaud Donnedieu de Vabres, a inauguré une exposition de sculptures de Gottfried Honegger dans ce jardin du Palais-Royal. Les œuvres présentées sur deux pelouses, dont la création s'échelonne de 1995 à 2001, résultent de l'immersion totale de l'artiste dans les couleurs de la ville de Cannes où il séjournait alors. Gottfried Honegger extrêmement sensible aux couleurs vivantes et profondes de la mer, du ciel, du soleil, des plantes, transpose son sentiment en réflexion : *"l'art est le miroir d'une société, d'une époque, d'un moment"*.

Les seize œuvres, simplement numérotées, ont été voulues anonymes par l'artiste, pour s'inscrire, comme il aime à le dire, "dans l'esprit de l'art concret". Certaines sont autant de "pliages" constitués d'éléments en acier émaillé au dessin régulier et à angle droit dont les volumes angulaires sont rehaussés et valorisés par des teintes vives. Pour

d'autres ces mêmes pliages dégagent des volumes cylindriques parfaitement géométriques.

D'un point de vue moins descriptif, Serge Lemoine pense que les réalisations de Gottfried Honegger *"longue-ment préparées, patiemment fabriquées avec leur unique couleur, leur composition à la fois dépouillée et tellement savante, sont le signe d'un débat intérieur qui témoigne au plus haut point de la création d'un homme"*. La patte du dessinateur industriel est visible. La simplicité des formes, l'unité des couleurs sont aussi perçues comme une réponse minimaliste à la société de consommation. Nul besoin de lasers ultra puissants, de projecteurs agités dégoulinants de photons pour attirer l'œil durablement. Un jardin, des couleurs qui s'opposent ou non font autant d'effet.

Le temps d'un été les couleurs chaudes de Gottfried Honegger se seront rafraîchies aux fontaines de Pol Bury sous le regard souriant ou interrogatif des touristes et des parisiens. ●

Gottfried Honegger

Gottfried Honegger est né en 1917, à Zurich en Suisse et s'exprime par la peinture dès 1938. Le climat artistique zurichois où se manifestent les représentants de l'art concret a fortement pesé sur sa carrière et l'a conduit à trouver une place à part.

C'est en 1958 qu'il acquiert une renommée internationale grâce au retentissement d'une exposition aux Etats-Unis. Il abandonne son travail de dessinateur industriel pour se consacrer exclusivement à l'art et s'installe à Paris. Tout en conservant l'influence de l'art concret zurichois de Bill et Lohse, Gottfried Honegger a recours pour sa conception, dans les années 60/70, à une programmation mathématique verticale, déterminée. L'utilisation de l'ordinateur lui permet ensuite le développement de ses recherches plastiques.

Au début des années 70 Gottfried Honegger travaille sur des compositions d'un nouveau type : les tableaux reliefs. Ces tableaux "objets", constitués de collages sur toile utilisent des couleurs et des formes standardisées et sont conçus de telle façon que la lumière change la perception de l'œuvre. L'artiste est à l'origine de la création, en 1990, de l'espace d'Art concret à Mouans-Sartoux notamment fondé sur cette réflexion de l'artiste : *"Trop longtemps on a isolé l'art de l'architecture et de la vie de tous les jours. Ce processus est important, car il veut démontrer que nous ne pouvons plus fournir de réponses ponctuelles à nos questions. Il s'agit du tout, dans le sens le plus ample du mot, et l'art doit donc sortir lui aussi de son isolement, afin de contribuer à l'aménagement de notre monde artificiel"*.

L'exposition du Palais Royal qui n'a duré que du 22 juin au 28 août 2006 a bénéficié du soutien du Centre national des arts plastiques et de la Hilti art foundation. En écho et dans le même temps, la galerie Denise René-Espace Marais a présenté des œuvres récentes du graphiste, peintre et sculpteur dont elle perçoit *"qu'il abolit les frontières entre tous les domaines de la création"*. De même la galiériste est frappée par *"sa recherche de pratique artistique puisqu'il envisage l'art comme une manière d'exister, une morale permettant une prise sur son destin"*.

“Le monde est un théâtre, la vie est une comédie : tu rentres, tu vois et tu sors.”

Cette phrase de Démocrite, philosophe grec du 4^e siècle avant Jésus-Christ, figurait en exergue du livret guidant notre réflexion, ou notre prière, lors des obsèques de Olivier AURY, membre fondateur et ancien président de Géomètres Sans Frontières, emporté en 2 mois par une maladie fulgurante.

Les intervenants nous rappelèrent ses traits de caractère qui, tel son prénom évoquant l'arbre solide qui défie le temps autant qu'il porte le rameau de la paix, marquèrent son passage dans notre association : participation accrue des étudiants ou jeunes géomètres aux missions topographiques, naissance de l'association équivalente en Espagne et participation effective aux missions d'Amérique latine.

A la différence de la citation, il ne fut pas seulement spectateur mais bien acteur et si nous le rencontrions moins

souvent ces deux dernières années c'est parce qu'il était très impliqué au sein de son club service dans les échanges de jeunes auxquels il a toujours accordé confiance et responsabilité puisqu'ils continueront le chemin que nous tentons de tracer, même si parfois l'absence de nouvelles à l'issue des missions laisse passer une ombre de nostalgie... ●

François BODIN

“Aza ny hafahezan'ny andro no alaina, fa ny halavan'ny taona heverina”

“Ne considérez pas la brièveté des jours mais pensez à la longueur de l'année” pourrait répondre en écho ce proverbe malgache aux longs moments qu'Olivier a consacré aux jeunes, moments dont cette année a vu un des aboutissements avec le séjour de notre première étudiante étrangère en France sous l'égide de GSF.

Mois d'enquêtes et de participations aux chantiers de VRD et élaboration d'un mémoire que le Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, avant même la soutenance et à la seule lecture des minutes, pense utiliser comme base d'un document de référence tant pour les étudiants des générations futures de sa section Information Géographique et Foncière qu'auprès des professionnels oeuvrant dans ce domaine et dont les géomètres et topographes forment une des sources importante.

Que cette réussite en devenir soit un signe encourageant les lecteurs de XYZ à laisser leurs craintes en coulisses pour faire

monter sur leur scène de théâtre professionnel de jeunes étrangers afin de les aider à devenir des acteurs professionnels de qualité. ●



Rina en réunion de chantier VRD.



Extrait de journal local relatant la réception du chantier que Rina a suivi de bout en bout et au cours duquel elle n'eut que des louanges.