

xyz

Éditée par l'
Association
Française de
Topographie
n°107

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



2^e FORUM DE LA TOPOGRAPHIE
Surveillance des ouvrages d'art
par des méthodes spatiales
et terrestres

Les dessous de Paris

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

Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg

Tania Landes
Maître de Conférences
INSA de Strasbourg

Stéphane Durand
Enseignant-Chercheur
ESGT Le Mans

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

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

Conception et maquette

Dorothée Picard

Abonnements: Evelyne Mesnis

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.

Juin 2006 • 2^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

■ La vie des écoles

> Mise sous licence GPL du logiciel
d'enseignement Exomatic
Hervé GONTRAN 12

■ 2^e Forum de la topographie

> Les exigences imposées aux travaux
de mensuration dans le projet
AlpTransit Saint-Gothard
Adrian RYF 16

> La lasergrammétrie appliquée
à l'auscultation des ouvrages d'art
Bertrand CHAZALY 18

> Topométrie et instrumentation face aux
enjeux de la surveillance des grands ouvrages



Hervé LANÇON - Sébastien PIOT 22

> Micro Géodésie pour le Guidage de Coffrage
des Murs Porteurs d'Immeubles "Tours"
Ian R SPARKS - Douglas McL HAYES
Joël VAN CRANENBROECK..... 28

■ SIG



> Identification et cartographie des
concentrations spatiales des accidents
de la route Application à la RN 11
(Ouest algérien)
Abdelkader MENDAS - Samir HAMDOUN
Hocine NECHICHE 35

■ Photogrammétrie



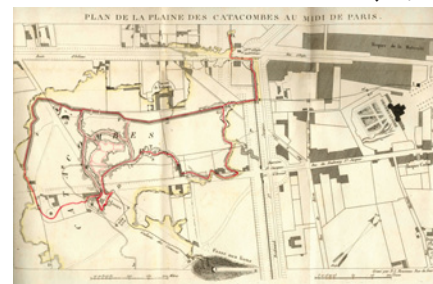
> Détection entièrement automatique
de points de fuite dans des scènes
architecturales urbaines
Mahzad KALANTARI, Franck JUNG 41

■ Histoire

> Hypothèses cosmogéniques du Moyen Age
occidental et de la Renaissance
Raymond D'HOLLANDER 47

> La pratique de l'arpentage au XIX^e siècle
Ambroise GARLOPEAU 51

> Les dessous de Paris "Cartes sur table" (1^{re} partie)



Gilles THOMAS 57

■ Art et Géométrie



> Peter Stämpfli :
l'empreinte
du pneu
Jean-Pierre
MAILLARD . 64

■ Livres 66

■ Courrier des lecteurs 70

■ Récréation

Raymond d'HOLLANDER 74

Pour la recherche de nos annonceurs
consulter la page 69.

Vous avez été nombreux à participer au Forum de topographie de l'AFT 2006 qui s'est tenu le 16 mars à l'ESTP à Cachan et l'association vous en remercie. Le niveau des conférences a été apprécié par tous et ne fait que refléter la diversité des thèmes chers à notre association. La surveillance d'ouvrage d'art constituait le sujet de prédilection cette année. Qu'il s'agisse de travaux de mensuration dans le projet AlpTransit Saint Gothard, du monitoring du viaduc de Millau et du terminal 2E de Roissy, de l'auscultation d'immeubles tours à Dubaï, de la surveillance par laser scanner 3D, les intervenants ont su éblouir l'assemblée en présentant les méthodes d'auscultation innovantes, le matériel de pointe employé et le haut niveau de précision respecté et exigé par leurs cahiers des charges. En parallèle, les exposants ont su faire partager les dernières évolutions en termes de technologies matérielles et logicielles. A chaque nouveau rendez-vous de la topographie, le visiteur s'étonne de constater que l'on n'arrête pas le progrès !

Le calendrier est marqué par des manifestations à caractère topographique de plus en plus nombreuses. Est-ce là le signe de changements fréquents et de nouveautés multiples, l'intérêt pour la topographie se fait-il grandissant ? Google et sa politique de développement diversifiée y sont probablement pour quelque chose. Après Google Earth, on entend parler de Google Maps, lancé fin avril 2006 en France. Vous cherchez une rue particulière dans le monde entier ? On vous projette d'une image satellite à l'échelle du pays vers un plan de la ville puis dans la rue souhaitée... D'ici 2007, l'IGN aura relevé le défi de proposer au moins autant de services à ses internautes et abonnés avec le Géoportail en 3 dimensions.

Alors quel rôle prend la carte ou le plan topographique ? La mesure est-elle encore l'art et le monopole du topographe ? La quantité et la rapidité prendront-elles le dessus sur la qualité ? L'information topographique, le progrès technologique du côté des services, des données, des matériels ou logiciels autrefois spécifiques à notre corps de métier deviennent accessibles à l'utilisateur lambda. Quel rôle jouera encore le géomètre dans le futur ? Que laissent présager les nouvelles technologies ?

Dans ce contexte, les Journées de la Topographie du 2 au 4 octobre 2006 de l'INSA de Strasbourg organisent un débat sur le thème : "Nouvelles technologies : quelles (r)évolutions pour la topographie ?". Les conférenciers tenteront d'apporter une contribution à la prise de conscience des évolutions et révolutions vécues ces dernières années dans le monde de la topographie ; afin de nous préparer aux évolutions futures, en portant un regard soutenu vers l'avenir. Les géomètres viendront également enrichir le débat dans le cadre de leur démarche prospective Géomètre-expert 2020.

Sommes-nous face à une révolution ? Jean Jaurès aurait répondu par "Il ne peut y avoir de révolution que là où il y a conscience". Sur ces belles paroles, je vous invite non seulement à participer aux Journées de la Topographie mais aussi et surtout à lire la revue XYZ, témoin de la prise de conscience de toutes ces évolutions !

Bonne lecture,

Tania Landes

Mise sous licence GPL du logiciel d'enseignement Exomatic

■ Hervé GONTRAN

Le Laboratoire de Topométrie, dirigé par le Prof. Bertrand Merminod, met le code source de son logiciel d'enseignement Exomatic à la disposition du public, en le publiant sous la licence "GNU General Public License" (GPL)¹.

Traditionnellement, les cours magistraux de topographie de l'EPFL sont suivis d'exercices individuels aidant les étudiants à maîtriser de manière autonome les concepts abordés en classe. La personnalisation de ces exercices permet surtout d'accroître l'estime de soi, ce qui est particulièrement bienvenu pour contrer l'anonymat des étudiants de première année. Cela satisfait également à des attentes pédagogiques en empêchant la simple copie de résultats, ainsi que l'attente passive de la version correcte.

Afin de maintenir les bénéfices des exercices individualisés tout en menant des activités de recherche, les enseignants du laboratoire ont introduit une composante d'e-learning comme évolution naturelle de l'instruction en topographie. Les leçons traditionnelles demeurent, tout en mettant l'accent sur l'auto-apprentissage via des exercices et des didacticiels en ligne, dénommés Exomatics. Fort du succès rencontré lors de l'utilisation des Exomatics durant deux années consécutives, le Laboratoire de Topométrie souhaite mettre librement à disposition du public le code source du logiciel développé par Hervé Gontran, en le publiant sous licence GPL. Nul doute que la communauté universitaire saura l'enrichir de nouvelles fonctionnalités, voire l'étendre à d'autres domaines que la topographie.

Exomatic en action

Conçu en tant qu'application multi-plate-forme, Exomatic automatise largement la production et la correction d'exercices individualisés. Entièrement implémenté à partir du langage de programmation Perl, Exomatic est un ensemble de briques interactives, illustrées à la figure 1.

- La préparation des exercices individualisés se base sur les données relatives aux étudiants du campus (noms, prénoms, courriels) et le choix par l'enseignant du type d'exercice. Ces données sont intégrées dans des pages web interactives et déposées sur un serveur web (étapes 1-3).
- Chaque étudiant accède alors au site web du cours (figure 2), peut lire un éventuel rappel de l'objectif de l'exercice et dis-

pose ensuite de ses propres données d'exercice sur la base de son nom. Une fois son problème résolu, il retranscrit les valeurs numériques. Ces résultats sont sauvegardés dans un fichier texte.

- L'automatisation des corrections revient à comparer les valeurs fournies par les étudiants à des valeurs calculées, en tenant compte d'une certaine tolérance. La notation est envoyée automatiquement par courriel à chaque étudiant et les corrigés publiés sur le web une fois l'échéance atteinte (étapes 4-8).

Au cas où les résultats numériques de l'étudiant sont en dehors des tolérances de l'exercice, l'enseignant s'efforce d'identifier la source d'erreur et d'ajuster la note manuellement. A noter que les étudiants peuvent ajouter des commentaires lors de la rédaction de leur exercice et que ceux-ci

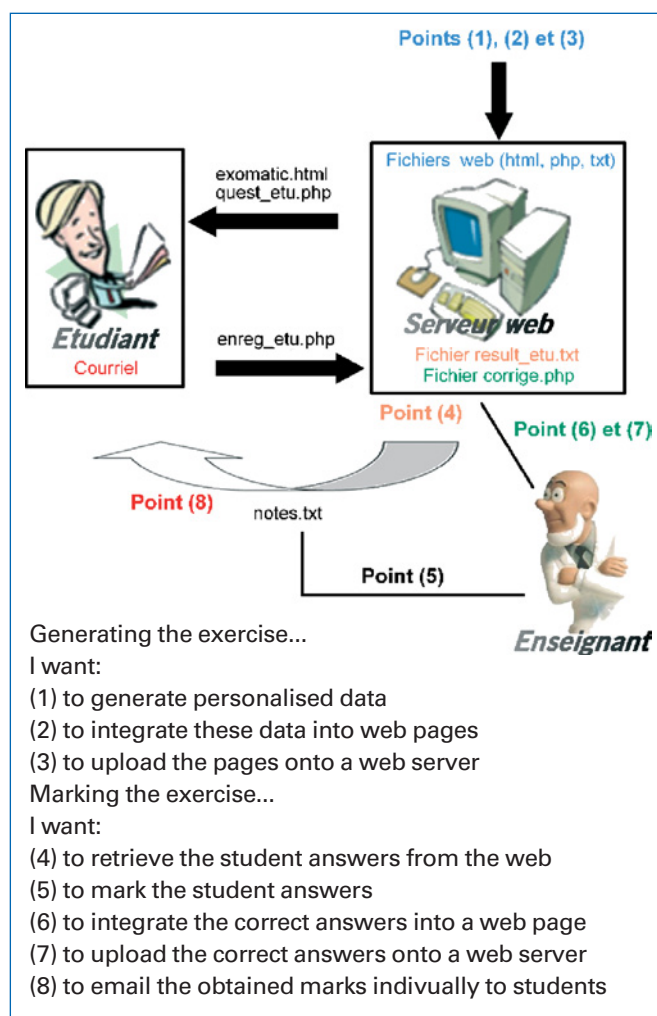


Figure 1 : Structure de l'Exomatic.

(1) GNU General Public Licence:
<http://www.gnu.org/licenses/licenses.html#GPL>

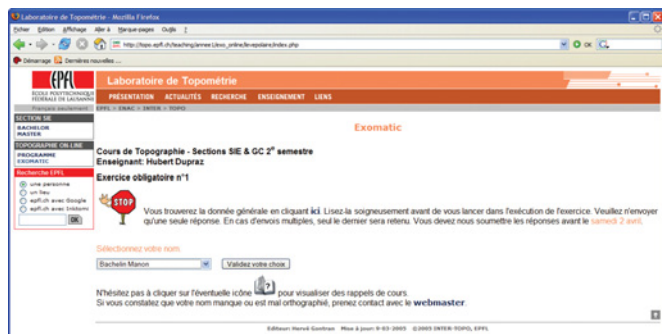


Figure 2 : Capture d'écran d'Exomatic à l'EPFL.

sont toujours lus par l'équipe enseignante qui ne manque pas d'agir. Il peut s'ensuivre une discussion personnalisée.

En termes concrets, Exomatic fournit un matériel pédagogique pour résoudre des exercices via une interface conviviale qui stimule l'implication des étudiants. Des illustrations attrayantes (figure 3) et le fait de s'adresser aux étudiants par leur prénom créent un environnement accrocheur qui est publiquement visible sur tout navigateur web.

Marche à suivre pour l'installation et l'utilisation

Remarque : il est fortement recommandé de suivre l'ordre des étapes figurant dans le menu d'Exomatic.

■ Préparation de l'exercice

- 1 - Procédure Perl de génération des données personnalisées. Les réponses correctes sont également calculées, puis stockées dans un fichier annexe. L'idéal est de pouvoir disposer d'une base de données d'étudiants du cours.
- 2 - Procédure Perl de mise en forme des données individuelles dans des pages web dynamiques. Il est possible de rendre ces pages compatibles avec la charte graphique de son site en utilisant par exemple NVU (cf. figure 2).
- 3 - Procédure Perl de transfert des pages web par FTP.

■ Exercice proprement dit

L'enseignant informe les étudiants de l'emplacement des pages web dynamiques sur le serveur web. Ces pages, créées par la procédure (2), exploitent la puissance du langage de script PHP aisément intégrable dans du code HTML. PHP assure les fonctionnalités suivantes :

- Affichage et récupération des données individualisées
- Dissimulation du code source aux utilisateurs
- Contrôle de validité des valeurs numériques
- Récupération des remarques et commentaires
- Enregistrement des réponses dans un fichier texte

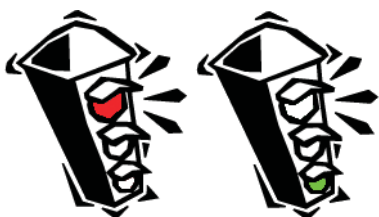


Figure 3 : Illustrations attrayantes.

■ Correction

- 4 - Procédure Perl de rapatriement des réponses des étudiants par FTP
- 5 - Procédure Perl de correction des réponses, en prenant en compte un seuil de tolérance pour attribuer la totalité des points, la moitié des points ou encore aucun. Un fichier collectant les notes est créé ; il contient des adresses e-mail générées suivant le modèle EPFL, prénom.nom@epfl.ch. L'enseignant exercera un regard critique sur les résultats obtenus.
- 6 - Procédure Perl d'intégration des réponses correctes dans une page web dynamique.
- 7 - Procédure Perl de transfert de la page de correction sur le serveur web par FTP. L'enseignant informera les étudiants de l'emplacement de cette page sur le serveur.
- 8 - Procédure Perl de diffusion par courriel des notes obtenues par les étudiants.

■ Intérêt de la mise sous licence GPL

La plupart des plates-formes d'*e-learning* nécessitent une bonne maîtrise de la programmation et de la navigation Internet. Exomatic est quant à lui réalisé à l'aide de logiciels bien documentés et d'utilisation relativement intuitive. La mise sous licence GPL garantit une forme de développement cohérent puisque laisser les sources du programme accessibles à tous permet de transformer ce projet de laboratoire en un projet de communauté et donc :

- de mutualiser les compétences,
- de développer plus rapidement,
- de faire plus de tests,
- et d'être plus ouvert sur les besoins des étudiants.

C'est aussi une question de modestie et d'intégrité : les langages (Perl, PHP) ainsi que l'outil d'édition des pages Web (NVU) sont tous des logiciels libres qui ont permis de réaliser Exomatic de manière rapide et cohérente.

Nous souhaitons qu'Exomatic soit librement accessible et ouvert, car nous espérons recueillir un maximum de retours d'expériences à la fois techniques et pédagogiques.

■ Institutions susceptibles de contribuer au projet

- Ecole d'Ingénieurs du canton de Vaud, Yverdon, Suisse.
- Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivie.
- Ecole Spéciale des Travaux Publics, Paris, France.
- Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, France.
- Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée, France.
- Institut National des Sciences Appliquées, Strasbourg, France.

■ Annexe : outils informatiques utilisés

- Perl: GNU "General Public License" (GPL).
- PHP: licence libre "PHP license v3.0"
- Apache: licence libre "Apache license v2.0" ●

Contact

Hervé GONTRAN

EPFL - TOPO

Bâtiment GC - Station 18 CH-1015 LAUSANNE

Tél : +41 21 693 57 95 - herve.gontran@epfl.ch

L'AFT organise la 4^e édition du concours : Prix de l'AFT pour les Jeunes Ingénieurs Diplômés en Topographie

Le conseil de l'AFT de septembre 2001 a approuvé le projet de création d'un prix de l'AFT destiné aux jeunes ingénieurs diplômés en Topographie. Les étudiants des Ecoles d'Ingénieurs sont invités à soumettre au comité de rédaction de la revue XYZ un article portant sur leur travail de fin d'études d'ingénieur géomètre-topographe. Les meilleurs articles seront récompensés et publiés dans la revue XYZ. Un montant global de 1 500 € est prévu en 2006.

Conditions de participation :

- être âgé(e) de moins de 26 ans ;
- joindre l'attestation du diplôme d'ingénieur ;
- être membre de l'AFT (être à jour de cotisation) ;
- proposer au comité de rédaction de la revue XYZ un article de 6 pages au moins en français (avec un résumé en anglais), en vue d'une publication dans la revue avec une présentation de l'ingénieur (résumé du curriculum vitae) ; les consignes aux auteurs sont téléchargeables sur le site Internet de l'AFT : <http://www.aftopo.org>
- certifier que l'article n'a pas été soumis ou publié dans une autre revue ;
- date limite pour la proposition des articles : le 1^{er} octobre 2006 (pour les projets présentés dans les Ecoles en 2005 et avant).

Comité d'attribution :

Le comité de rédaction de la revue XYZ, assisté du comité d'orientation scientifique, est chargé de désigner un comité d'attribution du Prix de l'AFT pour les Jeunes Ingénieurs Diplômés en Topographie. Ce comité pourra associer un représentant des Ecoles Françaises. La qualité du contenu scientifique et de la rédaction de l'article seront les critères essentiels retenus.

Publication des résultats :

- les candidat(e)s seront informé(e)s individuellement des résultats au plus tard le 1^{er} mars 2007 ;
- les résultats du concours seront publiés dans la revue XYZ dans l'année suivant la publication des résultats ;
- le Président de l'AFT remettra les prix à l'occasion d'une manifestation organisée par l'AFT en 2007.



ASSOCIATION FRANÇAISE DETOPOGRAPHIE

(association régie par la loi du 1^{er} juillet 1901 - N° SIRET 31876201000029 - CCP 16 300 03Y PARIS)
Bureau : 2, avenue Pasteur - 94165 SAINT-MANDE Cedex - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 43 74 72 80
Courriel : info@aftopo.org - Internet : <http://www.aftopo.org>
Secrétariat du lundi au vendredi de 9 heures à 17 heures

2^e Forum de la topographie



Cachan/ESTP 16 mars 2006

sur le thème :

Surveillance des ouvrages d'art par des méthodes spatiales et terrestres

Nous ne saurions trop remercier l'ESTP et son directeur Serge Eyrolles, son directeur des études Régis Vallée, pour leur accueil et aide matérielle apportés à cette journée, renforçant ainsi, s'il en est besoin, les liens jamais démentis entre l'école et l'AFT.

Remercions également Emmanuel Natchitz ainsi que les élèves pour leur collaboration efficace.

Côte à côte étudiants, professionnels, fabricants, utilisateurs, ingénieurs et techniciens, ont assisté à quatre conférences :

Les exigences imposées aux travaux de mensuration dans le projet AlpTransit Saint-Gothard
Adrian Ryf ETHZ (Suisse)

La lasergrammétrie appliquée à l'auscultation des ouvrages d'art ATM3D – Bertrand Chazaly

Topométrie et instrumentation face aux enjeux de la surveillance des grands ouvrages

Hervé Lançon Ingénieur ENSAIS – Directeur Technique SITES SA

Sébastien Piot - Ingénieur ENSAIS - Responsable du pôle MIR (Métrologie, Instrumentation, relevés) - SITES SA

Micro Géodésie pour le Guidage de Coffrage des Murs Porteurs d'Immeubles "Tours"

M. Van Cranenbroeck de Leica Geosystems

Nous publions les interventions des quatre conférenciers dans les pages suivantes.

Les participants pouvaient ensuite visiter l'exposition et échanger avec les dix exposants.

Nous retrouvons avec plaisir les fabricants et les produits souvent présentés dans nos colonnes à savoir :

ATLOG
DYNAOPT
GEOMEDIA
JS INFO
LEICA GEOSYSTEMS

MAURY INFORMATIQUE
MESURIS
SETAM INFORMATIQUE
TOPCON
TRIMBLE

Nous ouvrons également nos colonnes pour leurs communiqués.

Les participants et les élèves furent ensuite reçus par le conseil de l'AFT devant une collation offerte en leur honneur.

A. BAILLY



Les exigences imposées aux travaux de mensuration dans le projet AlpTransit Saint-Gothard

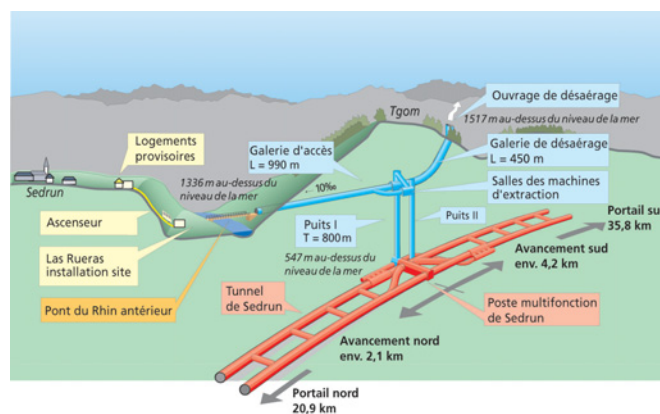
■ Adrian RYF

Presque deux tiers des 150 km de tunnel, galerie et puits nécessaires pour le tunnel de base du Saint-Gothard sont excavés (mai 2006). Tendus, les topographes attendent le premier de quatre percements de cette œuvre en été 2006.

Pour qu'ils puissent dormir tranquillement, ils ont respecté tous les principes essentiels de leur domaine professionnel en vue de réaliser le tunnel le plus long au monde avec la précision et la fiabilité exigées. Quelques aspects des nombreux travaux de topographie sont mentionnés ci-dessous.

Exigences imposées, mesures indépendantes

Le percement du tunnel de base du Saint-Gothard, long de 57 km et partie intégrante du projet AlpTransit, s'effectue simultanément depuis cinq sites différents (voir www.alp-transit.ch/pages/f/). Le maître d'œuvre a fixé l'écart maximal admissible en chacune des différentes jonctions prévues à 25 cm en direction et en distance et à 12,5 cm en altitude. Les



Les puits de Sedrun.

professionnels de la mensuration considèrent ces valeurs comme des tolérances au sens géodésique et en déduisent les précisions requises en planimétrie (10 cm) et en altimétrie (5 cm). L'objectif prioritaire poursuivi pour tous les travaux de mensuration réalisés dans le cadre d'AlpTransit est le recours à des méthodes de mesure de précision différentes, aussi indépendantes que possible les unes des autres, afin de parvenir à une modélisation optimale des sources d'erreur et surtout, de façon à éliminer toutes les erreurs systématiques.



Le portail sud à Bodio.



Le chantier du portail sud à Bodio.



Le gyroscope sur le pilier du portail de Sedrun.

Le réseau de base

Le réseau de base consiste en 30 points GPS environ avec une précision des coordonnées de 7 mm. Vu que la phase de construction dure presque 20 années, ces points doivent être contrôlés régulièrement. Ils sont soumis non seulement à des glissements potentiels locaux, mais aussi à des mouvements tectoniques, parce que la plaque africaine est encore en train de pousser vers les Alpes. En collaboration du consortium de topographie et des étudiants de l'ETH Zurich le réseau était contrôlé avec succès en été 2005.

Pour obtenir des altitudes précises, des corrections orthométriques strictes sont indispensables et des mensurations de gravité sont obligatoires. Les valeurs de correction montent jusqu'à 10 cm. Les soulèvements hétérogènes des Alpes dus aux mouvements tectoniques doivent être considérés pour les nivellements de précision.

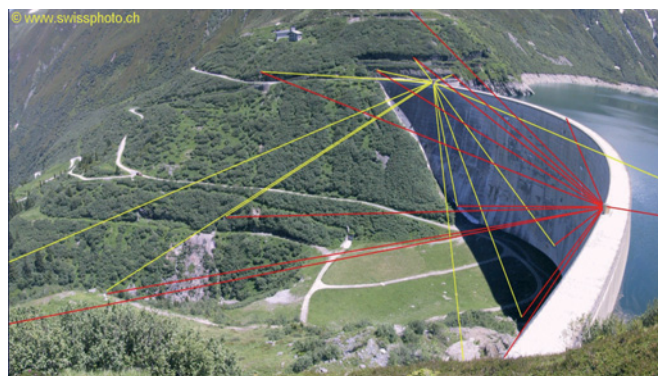
Le tronçon de Sedrun

A Sedrun, le percement du tunnel s'effectue à partir du fond de deux puits d'une profondeur de 800 m chacun, surmontés d'une caverne en tête de puits et reliés à la vallée du Rhin antérieur par une galerie d'un kilomètre de longueur. L'objectif assigné est de transférer la planimétrie, la direction et l'altimétrie au fond des puits avec une précision et une fiabilité aussi élevées que possible.

La descente de points a été réalisée d'une part avec des plombs optiques, d'autre part par des moyens mécaniques avec des fils en acier. Les précisions atteintes sont de 6 mm. L'altitude était transférée en mesurant des distances verticales du fond des puits vers le haut avec des distancemètres électroniques. Le transfert de direction s'effectuait comme dans le reste du tunnel à l'aide d'azimuts gyroscopiques mesurés avec le Gyromat 2000. Pour la toute première fois un système inertiel était utilisé comme méthode indépendante. La comparaison des deux méthodes donnait des différences minimales, un contrôle indépendant était ainsi réalisé.

Les effets à la surface de la terre

Les expériences sur divers sites de construction de tunnels en Suisse ont montré que la perturbation des niveaux d'eau à l'in-



Stations automatiques sur le barrage de Nalps.

térieur des montagnes peut causer des tassements à la surface de la terre. A la suite, les vallées peuvent s'ouvrir et se re-fermer, ce qui cause des changements de la largeur des vallées. Des vastes systèmes géodésiques permettent de contrôler les alentours des grands barrages au-dessus du projet AlpTransit complémentairement aux mensurations de déformation normales. Avec des stations automatiques des coupes transversales directement près des barrages et au nord et au sud d'une partie des lacs sont surveillées régulièrement pendant toute l'année. Des vastes nivellements de précision le long des routes principales et à travers les tunnels des centrales électriques et des stations automatiques GPS de points discrètes dans les alentours complètent les mensurations des tachéomètres. Les changements de la largeur des vallées observés avant l'avancement du tunnel, cela veut dire les mouvements naturels entre les saisons divers, montent à 15 mm au maximum. Des tassements de presque 10 mm étaient déterminés avec les nivellements, un rapport avec les travaux AlpTransit ne peut pas être exclu. ●

Référence bibliographique :

RYF, A. ; NEUHIERL, T. ; SCHÄTTI, I. [2005] : *AlpTransit Saint-Gothard : Les exigences imposées aux travaux topographiques sur le tronçon de Sedrun.* XYZ, éditée par l'Association Française de Topographie, n° 105, 2005.

Contact

Adrian RYF ing. dipl. ETH Zürich
ETH Zürich – Institut de géodésie et de photogrammétrie
Wolfgang-Pauli-Str. 15, CH – 8093 Zürich
adrian.ryf@geod.baug.ethz.ch

ABSTRACT

AlpTransit Gotthard is creating a flat rail link for future travelling through the Alps. At the heart of the new transalpine rail route is the world's longest tunnel – the 57 km long Gotthard Base Tunnel, which is being built simultaneously from five construction sites. For all parties involved, including the surveying engineers, the construction is a big challenge.

La lasergrammétrie appliquée à l'auscultation des ouvrages d'art

■ Bertrand CHAZALY

La lasergrammétrie est une science ou une technique en plein essor qui exploite la technologie des scanners laser 3D (mesure laser haute densité, sans contact et longue portée). Un scanner 3D lève plusieurs millions de points en trois dimensions en quelques minutes. La mesure laser peut être couplée à une prise de vue photogrammétrique numérique.

Les technologies les plus répandues sont la mesure du temps de vol, la triangulation et la mesure par différence de phase.

Développée à l'origine pour des applications industrielles, cette méthode de levé s'est étendue à presque tous les champs d'intervention du topographe et en particulier au génie civil.

■ mots-clés

Lasergrammétrie, scanner 3D, topographie, modélisation 3D, ouvrage d'art, génie civil, auscultation, tunnel, autoroute, barrage.

Terminologie

En France, la terminologie n'est pas encore établie officiellement. "Lasergrammétrie" semble consensuel ("laser" + "gramma", écrit ou dessiné, + "metron", mesure) mais d'autres termes sont aussi d'usage dans cette toute nouvelle activité professionnelle : scan-nage 3D, 3D laser scanning, Lidar (light detection and ranging), levé haute densité (HDS® de Leica), laserométrie... Il faut aussi noter que certains capteurs haute densité n'utilisent pas le laser comme source de lumière, même si leur utilisation reste anecdotique en topographie.

Avantage de la méthode sur le levé traditionnel

Le principe de la méthode est d'enregistrer en 3D tout ce qui est visible dans le champ de vision du capteur, on parle de modélisation "Tel Que Construit" mais également de clonage numérique. Il faut ensuite extraire l'information recherchée dans l'archive 3D à partir de traitements plus ou moins complexes.

La principale caractéristique de la méthode est la densité extrême du levé qui autorise des traitements cartographiques très précis lorsque cela s'impose.



Figure 1 : Levé au scanner 3D sur 15 km des quatre voies de l'autoroute A42, sous circulation et en balisage léger (extension des voies en terre-plein central).

Principaux avantages du levé au scanner 3D pour des exemples d'applications réalisées par ATM3D

Exemples d'applications	Densité du levé	Rapidité	Longue portée (inaccessibilité)
Tunnel sous circulation	X	X	
Autoroute et ouvrage sous circulation	X	X	
Tête de tunnel	X		X
Cartographie de barrages	X		X
Auscultation de talus	X	X	X
Auscultation de digues	X	X	X
Auscultation d'aéroréfrigérant	X		X
Passage de gabarit/Contrôle	X		
Levé de détails sous circulation	X		X
Orthophotos vraies	X		X
Cubature béton	X		

Tableau 1 : Principaux avantages du levé au scanner 3D pour des exemples d'applications réalisées par ATM3D

En génie civil, les avantages essentiels qu'offre la lasergrammétrie sont la rapidité d'intervention et la possibilité d'effectuer des mesures longue portée sur des zones à accès difficile ou contraignant. A la différence du levé au tachéomètre, le levé par scanner 3D permet très fréquemment de travailler sous circulation, sur une seule voie et en balisage léger (figure 1). Elle autorise aussi des mises en station en dehors des zones d'exploitation des ouvrages et selon des points de vue très favorables.

C'est généralement la combinaison de ces caractéristiques qui confère son intérêt à la méthode (tableau 1).

Les logiciels de traitement des données

En termes d'acquisition de données, un seuil technologique est franchi. Cependant la difficulté réside à l'heure actuelle dans le traitement et l'exploitation pratique du volume monumental de mesures enregistrées.

Le traitement des nuages de points nécessite toujours l'utilisation de logiciels spécifiques, développés exclusi-

vement pour la gestion de données 3D denses et généralement assez peu orientés vers les applications de génie civil. De fait, les procédés de traitement

des données issues d'un levé au scanner 3D peuvent comporter de nombreuses phases de traitements CAO manuels ou nécessitent des développements informatiques en interne.

Quelques exemples de traitement conventionnels en génie civil qui ont été automatisés chez ATM3D par des développements informatiques spécifiques :

- Extraction automatique de profils en fonction de la définition d'un axe projet et d'un pas régulier
- Représentation 3D des profils dans le système de coordonnées du projet
- Représentation 2D sous forme de cahiers de profils
- Passage de gabarit numérique (3D et 2D)
- Extraction automatique de séries de mesures pour le contrôle du passage et compilation dans un tableau type Excel
- Exploitation et rendu des gros volumes de profils
- Gestion et exploitation des bases de données photos et orthophotos.

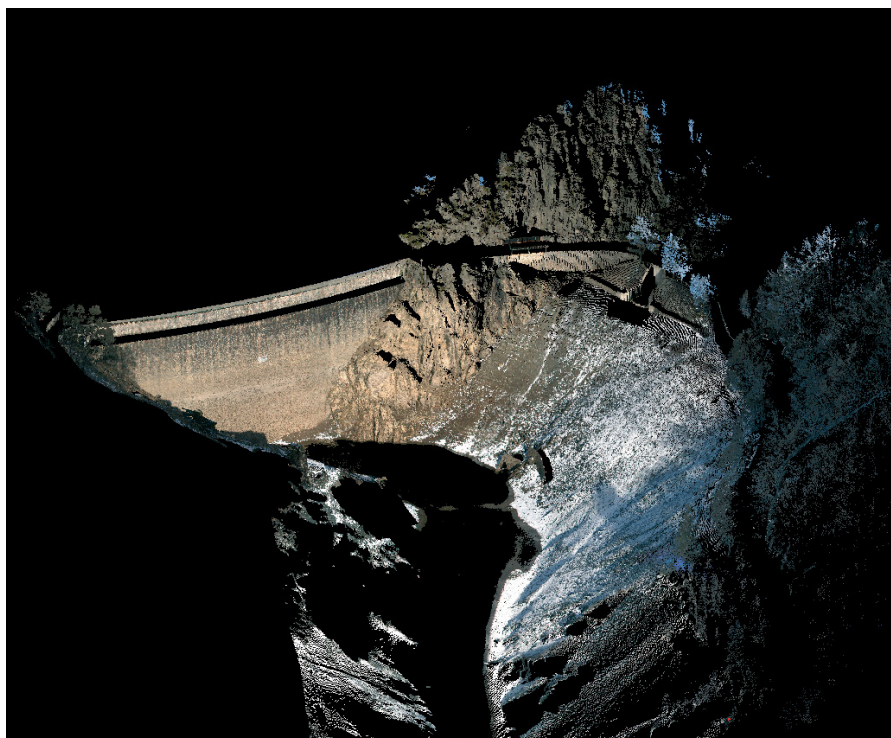


Figure 2 : Archive 3D (XYZRVB) du parement amont du barrage du Gouffre d'Enfer (Loire).



Figure 3 : Nuages de points et modèle 3D maillé en tunnel.



Figure 4 :
Modèle
surfaccique de la
digue de Tarnos
(Port de
Bayonne) et
traitement
topographique
en vue de son
auscultation.

Exemple d'une chaîne de traitement lasergrammétrique mise en place chez ATM3D pour l'auscultation des ouvrages

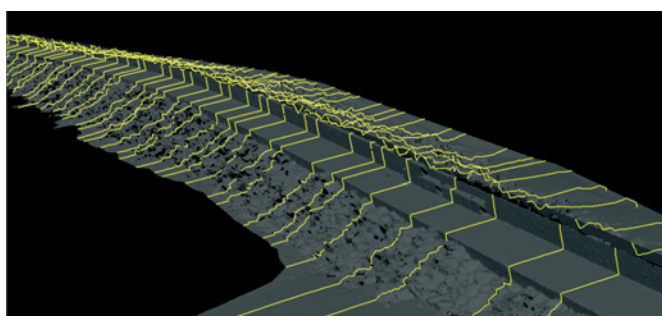
■ Première étape : l'archive 3D fondamentale

Quel que soit le type de capteur utilisé, le résultat d'une opération de numérisation est avant tout un fichier numérique contenant une série de coordonnées géométriques (X,Y,Z), constituant ce qu'on appelle un nuage de points 3D. Au nuage de points, sont parfois associées l'intensité de réflexion et les prises de vues numériques calibrées et géoréférencées (tableau 2).

Ces données, issues d'une campagne de levé sont alors les informations de base, vierges de tout traitement, pouvant constituer une archive brute de l'ouvrage, aux critères de résolution et d'accessibilité visuelle près (figure 2).

■ Deuxième étape : de l'archive 3D au modèle triangulé surfaccique

L'un des procédés de traitement en lasergrammétrie consiste à produire un modèle maillé surfaccique de l'ouvrage. Un modèle maillé tridimensionnel est une véritable peau numérique qui permet de reconstituer la géométrie de la surface numérisée.



Levé au scanner 3D photogramétrique des 7 km du tunnel APRR Maurice Lemaire	
Rendement	
Laser et photos tous les 5 m	200 à 300 m/jour
Laser uniquement tous les 25 à 50 m	Entre 300 et 600 m/jour suivant les masques
Donnée laser	
Type de données	X,Y,Z intensité du signal
Points utiles acquis	950 millions
Résolution du semis brut	1 point/cm à 1 point/5 cm
Précision XYZ des points laser	Ecart-type entre 1 et 2 cm
Données images	
Nb de clichés (17 millions de pixels par image)	6 800 clichés
Format traité	Raw RVB
Taille pixel	1 à 2 mm terrain

Tableau 2 : Caractéristiques de l'archive 3D des 7 km du tunnel APRR Maurice Lemaire (Eiffage Bouygues) en vue de la définition d'un nouvel axe, du passage numérique d'un nouveau gabarit et du contrôle visuel de la voûte.

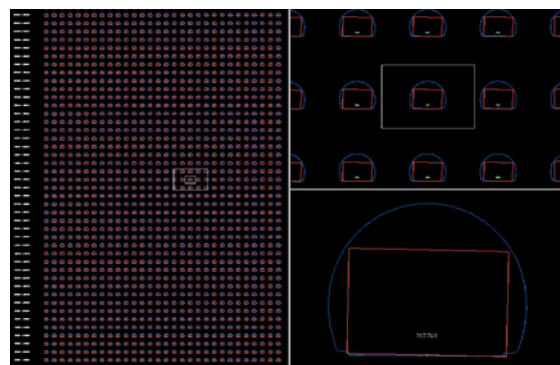
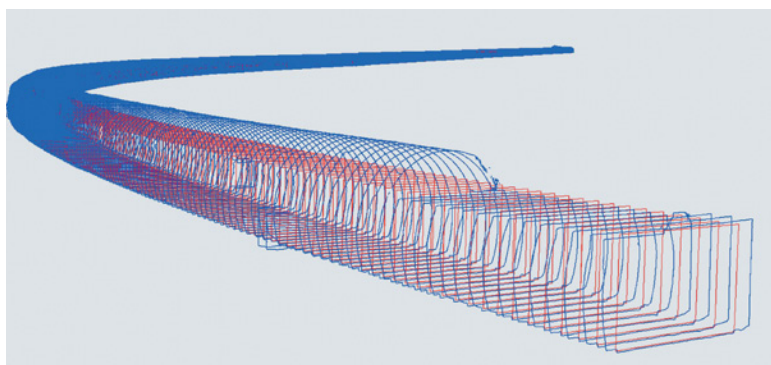


Figure 5 : Passage de gabarit sur les 7 km du tunnel APRR Maurice Lemaire (Eiffage Bouygues).

La densité des triangles est soit équivalente à celle des points acquis, soit simplifiée en fonction de critères géométriques précis compatibles avec les caractéristiques de l'ouvrage (figures 3 et 4).

■ **Troisième étape : du modèle triangulé à l'information topographique**

Une fois le modèle surfacique réalisé et optimisé, il devient assez aisé de procéder aux traitements topographiques. L'extraction de coupes et profils est facilement automatisable. La comparaison de deux modèles surfaciques d'un même ouvrage entre deux états ou avec son modèle CAO est également intégrée dans les logiciels spécialisés.

En revanche, les applications plus spécifiques au génie civil comme par exemple le passage de gabarit exigent des développements informatiques que nous avons dû mettre en place chez ATM3D (figure 5).

Le rendu 3D : un problème de culture technologique

En lasergrammétrie, le levé passe du domaine discret au domaine continu, de la 2D (ou 2.5D) à la vraie 3D. Ceci pose alors le problème de la restitution des résultats. Ce point n'est pas à négliger lors de la mise en œuvre d'un procédé lasergrammétrique dont les résul-

tats seront exploités par les progiciels de génie civil. Au-delà de la contrainte strictement technique que peut engendrer la transformation des données pour une restitution dans un système 2D (papier ou numérique), c'est un problème de culture technologique, d'appréhension de la 3D qui est parfois posé, et il est alors regrettable que l'expertise finale se prive de l'ensemble de l'information 3D. ●

Contact

Bertrand CHAZALY

Ingénieur Géomètre Topographe
Cogérant du bureau d'études ATM3D
tél. : 04 79 25 11 73
Contact@atm3d.com
www.atm3d.com



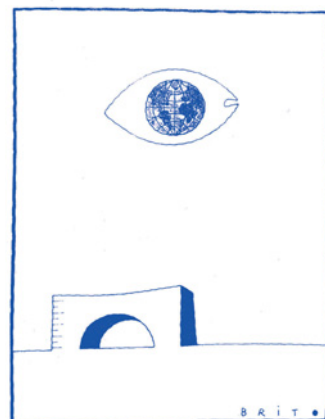
ABSTRACT

Terrestrial 3D laser scanning is particularly suitable to civil engineering. Safety, the low impact on the traveling public, and the very high density of the captured information are the issues which make scanning logical alternative to traditional methods. This new technology provides for appropriate solutions to a wide range of surveying requirements, but it still need specific software developments to see to the needs of construction works.

Topométrie et instrumentation face aux enjeux de la surveillance des grands ouvrages

■ Hervé LANÇON - Sébastien PIOT

La surveillance préventive, intégrant, entre autres, les activités d'auscultation et de monitoring, est devenue une nécessité pour un nombre croissant de structures de génie civil et d'ouvrages industriels, dont la dégradation ou la ruine génèrent des risques en termes de sûreté, de sécurité du public et exploitation, ou simplement en termes économique. Les techniques pour appréhender le comportement dans le temps de ces structures sont traditionnellement séparées en deux familles souvent présentées en concurrence : la topométrie ou auscultation géodésique d'une part, et la mesure à partir de capteurs sur ou dans les structures c'est-à-dire, l'instrumentation, d'autre part. Aujourd'hui, avec l'évolution technologique de ces dernières années, les instruments du topographe se sont rapprochés du concept de l'instrumentation et les progrès de l'optronique ont créé des capteurs utiles au topographe. Dans ce contexte, SITES offre aux Maîtres d'Ouvrage des solutions globales de surveillance préventive qui mêlent intimement ces deux approches pour créer une discipline adaptée à la problématique de la surveillance préventive. Au travers d'exemples extraits de deux projets de notoriété publique, on illustre cette complémentarité et l'apport de chacune de ces techniques envers l'autre et en particulier le rôle du topographe dans la mise en œuvre d'instrumentation.



Enjeux de la surveillance

■ Pourquoi surveiller ?

En premier lieu, la surveillance s'impose pour la sécurité des personnes et des ouvrages. La mise en œuvre d'une surveillance peut intervenir à différents stades de la vie d'un ouvrage :

- En construction
 - Pour assister les opérations de chantier
 - Pour valider les hypothèses de conception
 - Pour surveiller l'environnement de la construction.
- En exploitation
 - Pour prévenir suffisamment tôt des évolutions du comportement de l'ouvrage qui pourraient nuire aux bonnes conditions d'exploitation
 - Pour permettre de mettre en place au plus vite des solutions économiques de réparation planifiées.
- Après sinistre ou désordres importants
 - Pour surveiller le "malade" (monitoring) vis-à-vis des conditions d'exploitation restreintes
 - Pour alimenter le processus de compréhension de la pathologie.

Il apparaît évident que la mise en place d'une surveillance dès le premier stade permet d'optimiser le second et éviter le troisième, tout en optimisant le coût global de l'opération.

■ Les paramètres à surveiller

La surveillance préventive nécessite d'appréhender le comportement d'un ouvrage sur des intervalles de temps très larges, de quelques millisecondes à plusieurs années.

Les mesures concernent l'ouvrage lui-même (tassements, basculements, déformations et microdéformations, pression, température matériau, humidité...) mais aussi, et de manière tout aussi importante, son état de chargement, c'est-à-dire au sens large, l'environnement dans lequel il vit (trafic, vent, piézométrie...). A cela s'ajoute également la mesure de paramètres utiles à la correction intrinsèque des mesures.

Ces mesures doivent être réalisées avec des incertitudes associées, compatibles avec le comportement normal de l'ouvrage sous son état de chargement, et au regard de la fréquence des acquisitions et de la durée de la mise sous surveillance. Malheureusement, par méconnaissance et absence d'études préalables, l'incertitude de mesure est souvent déterminée par rapport aux performances disponibles des instruments ou capteurs.

■ Démarche de définition d'une surveillance préventive

En premier lieu il convient d'appréhender et analyser les risques et comprendre le fonctionnement de l'ouvrage. Cette phase doit permettre d'identifier les modes de dégradation attendue qui vont définir la fréquence des mesures à mettre

Figure 1 :
Vue générale
du viaduc
de Millau.

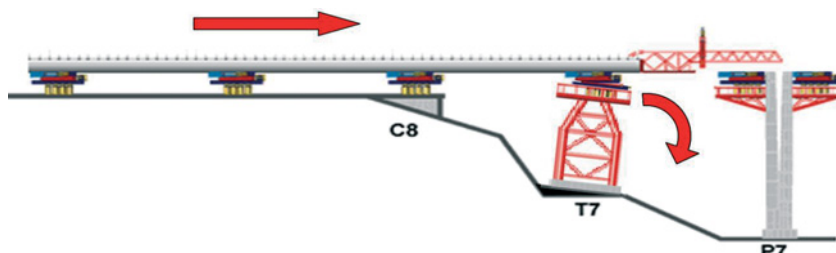


Figure 2 : Principe de la surveillance continue des mouvements transversaux et longitudinaux de la palée pendant lançages à l'aide de télémètres laser.

en œuvre ainsi que les descripteurs qui représentent le mieux l'apparition de désordres, et qui feront l'objet des mesures. Cette première approche, surtout appuyée sur des études de conception ou de modélisation, doit intégrer l'effet des conditions de chargement et environnementales pour définir au mieux les critères d'incertitude de mesure admissibles. Ensuite, vient le choix des techniques de mesure qui se doit d'être fait parmi un éventail le plus complet de principes ou technologies et exige donc de ne pas être lié à une technique unique (en l'occurrence la topométrie ou l'instrumentation).

Les outils disponibles

■ Instrumentation

Capteurs de déplacement – Téléniveaux hydrostatiques
Inclinomètres – pendules – Extensomètres à corde vibrante, à fibre optique – Piézomètres, cellules de pression...
Sondes de température, anémomètres, humidité...
Accéléromètres – Télémétrie...

■ Topométrie

Nivellement direct – Station totale, laser tracker, télémètres
Photogrammétrie, photothéodolite – Satellite et "GPS Indoor" – Scanner 3D - lasergrammétrie

Illustration sur le viaduc de Millau (figure 1)

■ Programme de surveillance

Le programme de surveillance a été établi sur la prise en compte de trois sources de besoins :

- Les exigences contractuelles liées à la surveillance préventive de l'ouvrage sur sa durée de vie
- Les besoins des études et de la conception (besoin de validation d'hypothèses *in situ*, confrontation calcul/réalité)
- Les besoins liés aux méthodes de construction.

Les difficultés techniques pour la mise en œuvre d'une instrumentation de surveillance sur un tel ouvrage sont liées d'une part à l'étendue temporelle des phénomènes à appréhender (d'une fraction de seconde pour les sollicitations dynamiques à de nombreuses années pour le suivi du vieillissement des matériaux) et d'autre part aux grandes dimensions spatiales de l'ouvrage rendant certaines techniques de mesures "classiques" inopérantes.

■ Grandeurs physiques mesurées

Hors mesures topométriques de précision effectuées par le groupement d'entreprises en phase construction (Nivellement, tachéométrie robotisée, GPS), le tableau ci-après précise la nature des principales grandeurs mesurées par l'instrumentation pour la surveillance. En effet, les dimensions et la constitution de l'ouvrage lui confèrent un comportement très souple, engendrant de grands déplacements du tablier et des têtes de pile sous charge thermique et de vent. Cette configuration rend impossible la réalisation d'opérations topographiques pertinentes; la durée des opérations est beaucoup trop grande par rapport à la cinétique d'évolution du comportement normal de l'ouvrage. La surveillance est pour cela entièrement basée sur un système d'instrumentation permettant des acquisitions synchrones sur tout l'ouvrage et de fréquence élevée.

A noter que l'auvent de la gare de péage a également fait l'objet de mesures spécifiques au cours de la préfabrication des voussoirs (extensomètres à corde vibrante).

■ Acquisition des mesures

Présentation générale

Les grandeurs physiques à mesurer, présentées ci-avant, ont des besoins d'acquisition très différents en termes de périodicité. Il faut distinguer les acquisitions continues (celles qui

Grandeur	Unité	Concerne	Nbre	Type capteur	Phase (*)
Vitesse vent	m/s	Sur tablier	3	Anémomètre 3D à Ultrason, anémomètre girouette 2D	C, L, R, E
Température	°C	Air, béton pile, tablier	150	Pt 100, Pt100 1/3 DIN sur cannes noyées	C, L, E
Humidité	%HR	Pile, tablier	4		C, L, E
Inclinaison, rotations	mrاد	Semelles, piles, pylônes	35	Embases scellées pour mesures manuelles, inclinomètres électroniques	C, L, E
Extensométrie base longue	µm/m	Semelles, piles	15+54	Extensomètre fibre optique de type SOFO de longueur de 1 à 10 m, capteur LVDT sur barre invar 1m.	C, E
Extensométrie	µm/m	Palée - tablier	80 + 20	Jauges de contrainte	C, R
Accélération	mg	Piles, tablier, pylône	24	Servo-accéléromètres 2D, XY ou XZ	L, E
Déplacement	mm	Tablier, palées, joint de chaussée, balancelles	48	Télémètres laser – système Tracksites (figure 2), capteurs potentiométriques	L, E

Nature des grandeurs physiques mesurées par l'instrumentation de surveillance

(*) C : Construction, L : Lançage, R : Réception E : Exploitation

ont pour but de surveiller en permanence le non-dépassement de seuil et/ou d'enregistrer uniquement sur dépassement d'un critère), des acquisitions périodiques ayant pour objet principal le suivi du comportement à moyen ou long terme.

L'acquisition périodique est réalisée manuellement pour des périodes supérieures à la semaine et de façon automatique pour des périodes plus faibles. En phase construction, des modems GSM permettent la consultation des acquisitions depuis un poste distant.

Les mesures en mode continu sont confiées à des unités d'acquisition industrielle permettant un échantillonnage à 25 Hz pour les mesures accélérométriques et jusqu'à 100 Hz pour les déplacements pendant lancement.

Concrètement (hors mesures manuelles), les dispositions techniques mises en œuvre se déclinent suivant trois familles de systèmes :

- des systèmes d'acquisition lents (jusqu'à une mesure par seconde), autonomes, pour des mesures périodiques dont la visualisation en temps réel n'est pas utile, et dans lesquels on trouve les techniques du topographe,
- des systèmes d'acquisition lents, en réseau, et dont l'architecture permet leur traitement depuis le poste de supervision au niveau de la gare de péage en phase d'exploitation,
- des systèmes d'acquisition dynamique, en réseau, organisés suivant la même architecture mais déclenchés sur dépassement de seuil de vent ou d'accélération.

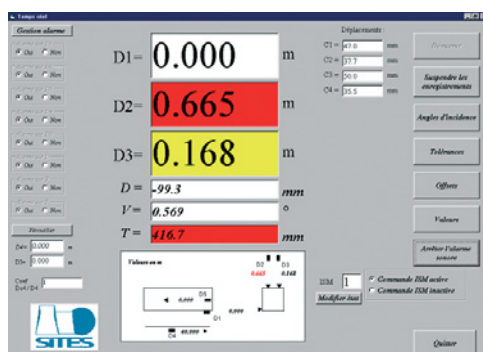


Figure 3 :
Extrait des visualisations présentes au cours des lancements.

Ces deux derniers types de système ont été également utilisés pendant les phases de lancement avec une visualisation en temps réel au niveau des bureaux de chantier, fournissant des indications précieuses pour le bon déroulement de la phase (cf. figure 3). Les mesures en provenance du tablier en mouvement, sont véhiculées par une fibre optique se déroulant à l'avancement, sur un protocole de type Ethernet.

En phase d'exploitation du viaduc, c'est sur ce même protocole, par le biais d'un réseau cheminant à l'intérieur du tablier et jusqu'à la barrière de péage située à environ 6 km au nord, qu'est rapatrié l'ensemble des mesures des grandeurs intéressant le comportement de l'ouvrage.

Cas particulier des acquisitions dynamiques

En phase exploitation, l'acquisition dynamique concerne les 24 voies des accéléromètres bidirectionnels installés sur piles, pylônes et tablier ainsi que les extensomètres installés sur les piles P2 et P7. Ces acquisitions sont accompagnées des enregistrements des mesures de vitesse de vent en 3D, prélevées en haut du pylône PY2. Afin que ces mesures puissent être analysées dans le domaine fréquentiel, il convient qu'elles soient acquises de façon synchrone, malgré l'éloignement des différents capteurs et leur raccordement individuel à une liaison numérique de type Ethernet, dont les temps de réponse dépendent du trafic de la ligne.

Pour assurer cette synchronisation, l'originalité du système réside dans la mise en place, au niveau de chaque concentrateur en contact direct avec les capteurs, d'un récepteur GPS, captant des signaux de synchronisation émis par les satellites. Ces signaux se trouvent donc enregistrés en parallèle aux mesures dynamiques de chaque capteur et permettent ainsi de garantir une acquisition synchrone de toutes les voies de mesures et d'offrir des possibilités de traitement fréquentiel fiable. Une application informatique spécifique, baptisée S3dyn, permet la supervision de l'activité "dynamique" simultanément aux acquisitions statiques continues.

Traitement des mesures

Suivant la nature des mesures effectuées et la phase à laquelle elles se rapportent, le traitement des mesures est très différent.

On peut citer (liste non exhaustive) :

Vent : les mesures en permanence permettent la corrélation avec les relevés de Météo France effectués par la station de Millau Soulobres et permettent également le déclenchement des acquisitions accélérométriques sur le tablier hors lançage et pendant lançage.

Température : mesures indispensables au traitement correct des autres mesures (dilatation, retrait, fluage).

Humidité : pour correction du suivi du retrait-fluage du béton et pour surveillance de l'humidité dans le caisson métallique (corrosion).

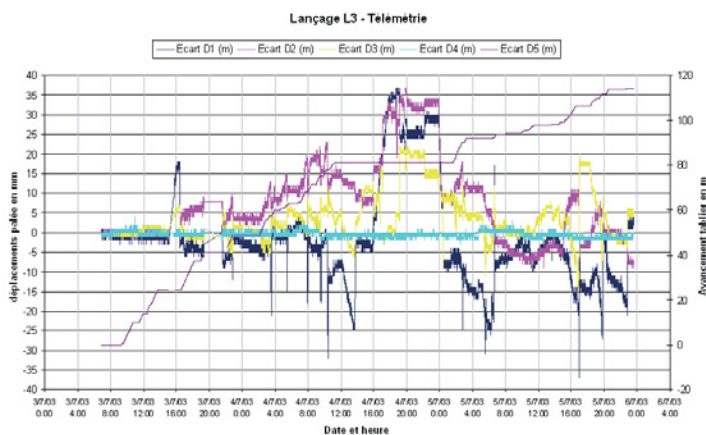
Inclinaison/rotations : pour surveillance à long terme des basculements d'appui en complément aux nivellements de précision et des inclinaisons de piles et pour le suivi des pylônes pendant les lançages.

Extensométrie base longue : dans la semelle de la pile P2, surveillance des variations dimensionnelles différentielles entre le niveau supérieur des têtes de puits marocains et la pleine masse de la semelle (cf. encadré). Suivi du retrait/fluage et surveillance des contraintes dans les fûts de piles, notamment sous les effets dynamiques du vent.

Extensométrie par jauge de contrainte : caractérisation des contraintes et de la raideur de la palée d'extrémité pour confrontation au calcul. Essai de flexion locale du tablier lors de la réception.

Accélération : données utiles à la caractérisation modale du tablier (sur excitation vent et lors des essais de réception par lâcher de masse). Surveillance en continu des accélérations induites par la sollicitation du vent

Déplacement : surveillance continue, par télémétrie laser à haute cadence, des déplacements en tête de palées d'extrémité et des balancelles au cours des lançages, incluant une mesure de référence pour la correction des erreurs dues à la variation de la réfraction (cf. graphe 4). Surveillance des déformations des âmes du caisson central (patch-loading). Surveillance des déplacements des joints de chaussée.



Graph 4 : Enregistrement des déplacements appui P17 pendant un lançage.

Extensomètre SOFO Base Longue



Vue d'un capteur Sofo.

Un extensomètre a pour objet de mesurer les variations dimensionnelles d'un matériau de structure et permet de remonter à des variations de contraintes (traction/compression). Traditionnellement, ces capteurs procèdent à des mesures sur des bases très courtes (au mieux quelques centimètres), à partir de technologies résistive, inductive, à corde vibrante... Suivant les besoins, ces mesures sont ensuite intégrées ou extrapolées sur la distance recherchée (intégration mécanique ou extrapolation par calcul). Le capteur Sofo (Surveillance d'Ouvrage par Fibres Optiques), opère directement la mesure sur des bases pouvant atteindre plus de 20 m. Plus précisément, ce capteur est constitué de deux fibres optiques, l'une tendue (appelée fibre de mesure) et l'autre légèrement détendue (appelée fibre de référence) entre les deux points d'ancrage du capteur. Ces deux fibres sont protégées dans un tube en polyéthylène étanche et terminées par un miroir. La mesure de la variation dimensionnelle de la base constituée entre les deux points d'ancrage, est réalisée par interférométrie de type Michelson. L'interféromètre procède à la mesure de la variation de la différence d'allongement des chemins optiques entre les deux fibres. En effet, le chemin optique constitué par la fibre de mesure va être modifié par la variation de distance entre les deux points d'ancrage et par les variations de température (dilatation de la fibre), alors que le chemin optique au cœur de la fibre de référence, non tendue, ne subira que l'allongement dû à sa dilatation thermique. Le capteur SOFO permet donc l'obtention des variations dimensionnelles entre ses points d'ancrages en toute indépendance de la température, avec une résolution de mesure de $2\mu\text{m}$ quelle que soit la longueur de la base (résolution de l'interféromètre employé), et pour des variations pouvant atteindre 1 % de la longueur de la base. Les mesures sur un capteur Sofo peuvent être effectuées ponctuellement (au moyen d'un poste de lecture portable) ou bien être obtenues au moyen d'une unité d'acquisition automatique installée en poste fixe. Le capteur est installé indifféremment au cœur du matériau (noyé dans le béton à la construction) ou à sa surface. Pour le topographe métrologue, ce capteur trouve des applications complémentaires intéressantes grâce à sa faculté de pouvoir fournir l'évolution dimensionnelle sur le long terme, à quelques micromètres près, de bases de plusieurs mètres. On peut citer par exemple :

- **Transmission d'un nivellement entre deux planchers** : Traditionnellement, une transmission d'un nivellement entre deux planchers se fait au moyen d'un élément stable dimensionnellement (canne de silice, tige Invar). Le capteur Sofo permet ici de mesurer le déplacement réel.
- **Réseaux de micro trilatération** : Les contraintes d'environnement en industrie, sur chantier ou en centre de recherche font que, parfois, il est difficile voire impossible de faire "passer" des visées optiques directes. Une alternative est alors de constituer un réseau de capteurs Sofo noyés dans les structures qui, à chaque campagne de mesure, est déterminé parallèlement aux observations topométriques. Les données des capteurs Sofo peuvent alors être incorporées dans un réseau comme des données de trilatération (cette technique a été mise en œuvre pour la surveillance dimensionnelle du massif de fondation de la plus haute pile du viaduc de Millau lors de son bétonnage).

■ ■ ■ Au-delà des utilisations spécifiques citées ci-avant, les données recueillies alimentent déjà la base de données du comportement de l'ouvrage. Celle-ci est désormais enrichie par les acquisitions qui sont effectuées depuis la mise en service de l'ouvrage par le biais de l'application informatique installée en gare de péage (figure 5).

Ensuite, l'exercice consiste, après étude, à ne conserver que les mesures et traitements représentatifs de l'état de santé de l'ouvrage. C'est de cette phase d'étude, déjà initiée, que dépendent la pertinence et la pérennité du système d'instrumentation. L'objectif est d'obtenir, avec le minimum d'indicateurs accessibles au poste de supervision, une vision précise de l'évolution de l'ouvrage.

Exemple de la surveillance des structures du terminal 2E après accident

■ Contexte et enjeux

Après l'effondrement des voûtes d'une partie de la jetée du terminal 2E de l'aéroport de Roissy, SITES est intervenu pour mettre en place une méthodologie de surveillance et d'investigation ayant pour objet :

- de réaliser un état des lieux des structures restées en place
- d'appréhender puis surveiller leur comportement et ceci dans le but d'assurer au plus tôt la sécurité du personnel devant intervenir sous la jetée et alimenter le processus d'enquête.

Dans le respect des règles de confidentialité liées à ce dossier, les résultats des mesures et investigations ne peuvent pas être publiés.

■ Description de la structure

La jetée du terminal 2E est constituée de deux parties indépendantes que sont la voûte et ses piles et les structures intérieures. La voûte se compose d'anneaux qui sont eux-mêmes l'assemblage de 3 éléments en béton armé clavés qui reposent sur deux piles par l'intermédiaire d'appareils d'appui. Une partie des efforts de la voûte est reprise par des tirants métal-

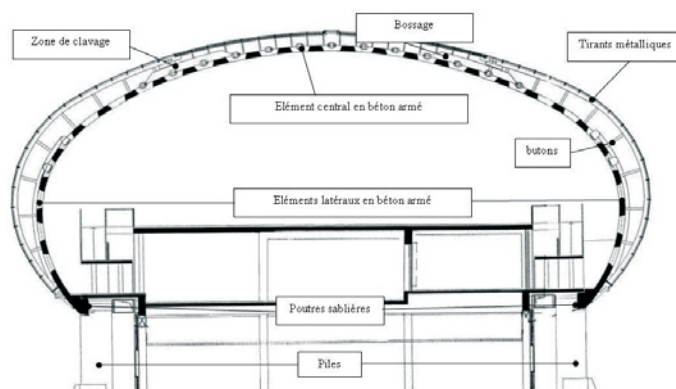


Figure 6 : Coupe de principe du terminal 2E.

liques par l'intermédiaire d'une série de butons. Une poutre sablière longitudinale relie les différents anneaux qui constituent l'ensemble.

Le schéma de principe de la structure est fourni en figure 6.

■ Etat des lieux

Les opérations réalisées dans le cadre de l'état des lieux comprennent :

- un relevé de la géométrie transversale des voûtes, à l'aide d'un tachéomètre robotisé équipé de distancemètre sans réflecteur. Les profils ainsi obtenus ont pu être comparés aux profils théoriques et ont permis de mettre en évidence les déformations acquises, et ceci à l'erreur près de la conformité du profil théorique au profil réel d'origine.
- Le relevé des tassements et basculements des appuis par nivellement direct et tachéométrie pour évaluation des tassements et basculements acquis depuis la construction, à l'erreur près de la conformité de l'exécution.
- Le relevé exhaustif de la fissuration en intrados des voûtes et sa caractérisation complète en termes géométriques (relevé à l'aide du procédé SCANSITES (figure 7), permettant une cartographie assistée des désordres visibles et la constitution d'une base de données géoréférencée de ceux-ci). Ces relevés ont permis d'alimenter les études et modélisation effectuées dans le cadre de l'enquête.

Figure 5 : Interface de l'application de gestion en gare de péage.

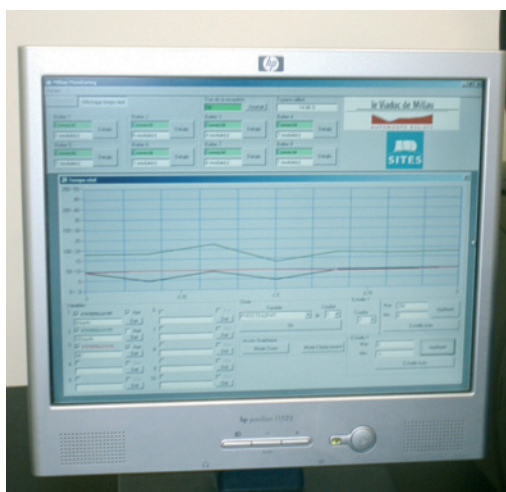


Figure 7 : Tourelle SCANSITES.



Figure 8 : Télémètre laser.



Figure 9 : Inclinomètres sur une poutre sablière.

■ La surveillance en continu

La surveillance en continu a été installée dans une double optique. La première est de garantir la sécurité des intervenants en déclenchant une alarme de manière quasi instantanée en cas de mouvement anormal de la voûte. La seconde est d'étudier de manière très fine le comportement d'une partie de la voûte afin de confronter son fonctionnement réel à son modèle de calcul et ce dans le but d'expliquer complètement l'accident.

La surveillance en temps réel des mouvements anormaux de la voûte a été assurée par une batterie de télémètres laser. Ces capteurs offrent une répétabilité sur le court terme de ± 0.25 mm pour une incertitude absolue de quelques mm avec une cadence de mesure de 1 000 Hz (figure 8).

Couplé à un système d'acquisition équipé d'un logiciel d'analyse et de corrélation des déplacements développé spécifiquement, l'ensemble est capable de valider et déclencher une alarme sur un délai très court (0.1 seconde environ), avec un très haut niveau de fiabilité.

La surveillance du comportement de la voûte dans le but de comprendre l'accident a largement fait appel à l'instrumentation et la topométrie. Citons le suivi des rotations des piles et de la poutre sablière par l'intermédiaire d'inclinomètres fournissant des mesures à $10 \mu\text{m/m}$ près (figure 9). Ces mêmes piles ont été suivies en nivellement direct de haute précision afin de détecter des tassements relatifs jusqu'à 0.2 mm. Les relevés réguliers de la voûte au tachéomètre de haute préci-

sion ont permis, en complément de la télémétrie, de suivre finement les déformations de la structure.

Un réseau à fibre optique à base longue de type SOFO a été installé sur la coque. Il a constitué le moyen le plus efficace pour suivre les profils de fissuration et de déformation.

L'ensemble des mesures est associé à plus de 40 sondes de température afin de caractériser le comportement thermique de la structure ainsi que de décorrélérer les mesures (figure 10).

Conclusion

Des télémètres en réseau de capteurs qui scrutent les mouvements de quelques dixièmes de mm à 1 000 Hz, des extensomètres à base longue noyés dans le béton qui fournissent les variations de géométrie d'un massif de 30 m de côté, des stations totales robotisées qui surveillent en continu les déformations d'un ouvrage... autant d'exemples qui montrent que la pertinence d'une surveillance préventive de structures, d'ouvrages et d'environnement doit puiser ses fondements tout aussi bien dans la famille des outils topographiques, que celle des systèmes d'instrumentation industrielle, après avoir bien établi les enjeux, en relation avec les spécialistes de la conception des structures. Cette approche globale est une nécessité pour le topographe ou le "géomaticien" qui souhaite s'investir dans la surveillance, tout en conservant son bon sens de la mesure et de la réalité. ●

Contact

Hervé LANÇON (Ingénieur ENSAIS - Directeur Technique)

h.lancon@sites.fr

Sébastien PIOT (Ingénieur ENSAIS - Responsable du pôle MIR Métrologie Instrumentation Relevés)

s.piot@sites.fr

Société SITES

2 bis, avenue du Centre - 92500 RUEIL-MALMAISON - France

www.sites.fr

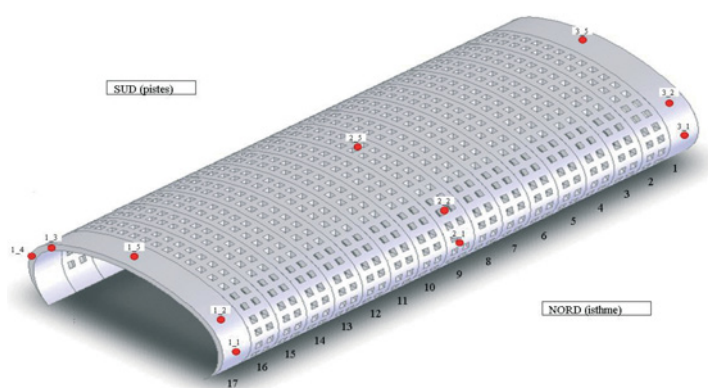


Figure 10 : Extrait de l'implantation des capteurs de température.

ABSTRACT

Usually, the activities of auscultation and monitoring of large structures like bridges, dams... are separated in two approaches. In the first hand, there are the topometric or geodetic technology, using optical, optronic and satellite measurements, and in the second hand the instrumentation technology with sensors on structures and automated acquisitions. Recent developments of topographic instruments and industrial sensors, and the evolution of the needs in monitoring of structures are going to clear the boundaries between these two approaches. On two famous projects, the Millau viaduc and the air terminal 2 at Roissy airport, we illustrate the necessary complementarity of these techniques and the part that the surveyor must take in this growing activity.

Micro Géodésie pour le Guidage de Coffrage des Murs Porteurs d'Immeubles "Tours"

■ Ian R SPARKS, Australia, Douglas McL HAYES, Dubai

Joël VAN CRANENBROECK, Belgium

Depuis quelques années, un intérêt accru se porte sur la construction d'immeubles "tours" géants. En plus d'atteindre des hauteurs considérables, ces structures soumises à des contraintes importantes au cours de leur construction, peuvent parfois considérablement vaciller. Ces contraintes sont dues principalement à l'effet de vents importants, aux grues qui sont ancrées sur la structure, aux effets thermiques et autres sollicitations.

Le mouvement de ces structures engendre plusieurs problèmes pour le responsable de l'implantation des coffrages des murs porteurs. Ainsi à un instant donné la position précise de la structure par rapport à son état projeté aussi bien que la position des instruments de topographie doivent être fournies.

Des complications peuvent s'ajouter si l'on considère que les instruments utilisés - principalement des stations totales - doivent être maintenues en station sur une plate-forme en mouvement. Cette présentation décrit la procédure proposée qui combine l'utilisation du GPS et d'inclinomètres de haute précision afin de fournir des points de contrôle au sommet des ces structures en construction.



La tour Burj Dubai à Dubai (Emirats Arabes Unis) atteindra une hauteur de plus de 800 mètres lors de son achèvement en 2008. En plus d'être très haute elle sera aussi plutôt mince avec un comportement dynamique aux étages supérieurs dus principalement à la pression des vents, les contraintes exercées par les grues "tours" ancrées à la superstructure, à l'insolation et aux autres facteurs liés au processus de construction.

Le système de coffrage autoporteurs pour cette construction est relativement complexe et exige un nombre important de points de contrôle. Il a donc été nécessaire de développer un système topométrique qui pourra produire de manière efficiente ce grand nombre de

points et qui pourra toujours être opérationnel lorsque la construction atteindra un niveau où son comportement sera dynamique.

Une analyse des mouvements théoriques a été menée à bien et un système de topométrie mis en place qui délivre déjà un positionnement précis pour la mise en place des coffrages.

Système de mesure des coffrages des murs porteurs

Les mouvements de la structure créent plusieurs problèmes pour garantir une topométrie de précision. En effet, en un temps donné, les opérateurs doi-

vent exactement connaître le déplacement de la ligne de référence principale de l'ouvrage par rapport à sa position théorique et simultanément déterminer la position tridimensionnelle exacte de leurs instruments.

La solution préconisée utilise le système GPS pour établir des points de contrôle autour d'une station totale pour en dériver les paramètres d'orientation et de mise en station. Le système comprend un minimum de trois récepteurs GPS et antennes dont on a fixé à la base un prisme permettant le verrouillage automatique de la lunette de la station totale ainsi que les mesures de distance. Les récepteurs GPS et la station totale forment ainsi le "système de mesure".

Pendant la séquence de mesure de la station totale vers les points situés sur les éléments des coffrages, les récepteurs GPS enregistrent les données avec une cadence d'acquisition de 1 Hz. En début et en fin de levé un tour d'horizon est complété sur les prismes fixés aux antennes de réception des signaux du GPS.

Les données sont ensuite traitées au bureau en associant les enregistrements réalisés à la station GPS permanente, établie dans le périmètre du chantier et reliée à un PC au bureau des topographes. Le logiciel Leica GPS Spider gère la station GPS permanente et transfère les fichiers d'observation au format RINEX dans un répertoire donné.

Le logiciel Leica LGO de traitement des données GPS calcule les différentes lignes de base et convertit les résultats dans un système de référence local.

Les données de la station totale sont déchargées et calculées en utilisant la méthode de la station libre adaptée à cette situation. Une analyse statistique des résultats permet de qualifier ceux-ci avec une bonne redondance puisqu'on dispose d'observations indépendantes.

Puisque la tour subit des contraintes qui seront de plus en plus importantes lorsqu'on atteindra des hauteurs conséquentes, l'axe principal de la station totale ne pourra plus être aligné selon la verticale locale mais bien quelconque et libéré de son asservissement au compensateur bi-axial.

La station totale sera en quelque sorte considérée comme un capteur 3D dont une transformation dans l'espace ramènera les données dans le référentiel fourni par les positions des antennes GPS.

Système de contrôle des mouvements de la tour

Afin de contrôler et tenir compte des écarts de la ligne principale de construction de la tour, un réseau d'inclinomètres de haute précision est en train

Antenne GPS et prisme circulaire.



La tour Burj Dubai en construction.



■ ■ ■ de se mettre en place en suivant les progrès de la construction.

Au total, ce seront 8 inclinomètres de précision Leica NIVEL220 qui seront installés et reliés en réseau pour fournir en permanence l'état de la tour.

Les interfaces de communication à la norme RS-484 de ces capteurs seront reliées de proche en proche pour aboutir au PC du bureau des topographes.

Les données étant enregistrées et analysées en continu pour fournir les écarts de la ligne principale et qui seront pris en compte lors du dépouillement des résultats de la station totale.

Précision et analyse

Les premiers résultats indiquent une excellente cohérence entre les données issues du GPS et celles obtenues par la station totale. L'adaptation des données entre elles montre que l'on obtient régulièrement une précision millimétrique qui est confirmée par la bonne conduite des coffrages.

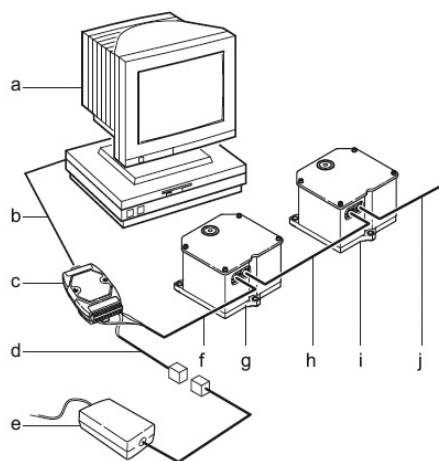
Les instructions de mise en place et de correction de ceux-ci sont en tout point identiques à ceux obtenus précédemment lorsque l'état d'avancement de la construction autorisait des visées sur des points de contrôle extérieurs à la tour.

Il est évidemment trop tôt pour bénéficier des avantages du système étant donné que la hauteur de la tour n'a pas encore atteint un niveau où les mouvements seront manifestement plus importants.

Conclusion

La combinaison et la fusion des données issues des récepteurs GPS, de la station totale et des inclinomètres de précision constituent le moyen de guider la construction de cette tour exceptionnelle tout en maintenant un ensemble homogène dans sa verticalité.

Mais c'est seulement le début d'un long périple et d'autres capteurs viendront progressivement compléter ce système



- a) PC
- b) Cable, Converter - PC
- c) RS232 / RS485 bus converter
- d) Cable, Lemo 1 (female) - Converter
- e) Power supply
- f) Cable, Converter - Lemo 0 (male)
- g) NIVEL220 RS485
- h) Cable, Lemo 0 (male) - Lemo 0 (male)
- i) NIVEL220 RS485
- j) Cable, Lemo 0 (male) - Lemo 0 (male)

Figure 3 : Inclinomètres de Précision NIVEL220 connectés au PC.

pour assurer une meilleure compréhension et la maîtrise du comportement dynamique de cet ouvrage.

D'autres projets bénéficieront certainement de cette approche si l'on considère que la tendance à construire de tel ouvrage se poursuivra en s'amplifiant.

Contacts

Douglas MCL. HAYES

Chief Surveyor, Burj Dubai Tower,
Samsung Besix Arabtech JV
dhayes@burjdubaijv.ae

Ian R. SPARKS

Project Surveyor,
Connell Wagner, Neutral Bay Sydney, Australia
ian.sparks@clearmail.com.au

Joël VAN CRANENBROECK

Business Development Director,
GNSS Reference Stations & Structural
Monitoring, Leica Geosystems AG
joel.vancranenbroeck@leica-geosystems.com

ABSTRACT

In recent years there has been considerable interest in the construction of super high-rise buildings. From the prior art, various procedures and devices for surveys during and after the phase of erection of a high-rise building are known. High-rise buildings are subject to strong external tilt effects caused, for instance, by wind pressures, unilateral thermal effects by exposure to sunlight, and unilateral loads. Such effects are a particular challenge in the phase of construction of a high-rise building, inasmuch as the high-rise building under construction is also subject to tilt effects, and will at least temporarily lose its – as a rule exactly vertical – alignment. Yet construction should progress in such a way that the building is aligned as planned, and particularly so in the vertical, when returning into an un-tilted basic state. It is essential that a straight element be constructed that theoretically, even when moving around its design centre point due to varying loads, would have an exactly vertical alignment when all biasing conditions are neutralised. Because of differential raft settlement, differential concrete shortening, and construction tolerances, this ideal situation will rarely be achieved. For this reason a regular matching of the reference system is required for surveys during the construction phase of a high-rise building once this has attained a certain height or a certain ratio of height to cross section. Up to now, surveying on high-rise buildings is done by geodetic electro-optical total stations yielding non-contact optical measurements of the points to be surveyed, these instruments periodically being referenced to fixed external reference points with known coordinates.

DYNAOPT

La synergie au service de la mesure

Unies par une philosophie commune, chacune de nos structures cherche à fournir à ses clients la solution la mieux adaptée à ses projets, quelles que soient les contraintes techniques.

Les projets de plus en plus sophistiqués nous ont conduits à repenser notre façon de travailler en rassemblant nos compétences et en mariant des technologies habituellement séparées :

- L'assistance technique en mesures géométriques appliquées à la construction et au suivi de sites,
- Le conseil et le soutien technique pour la mesure dimensionnelle d'objets industriels,
- La conception de systèmes de mesures intégrés pour l'instrumentation et l'auscultation,
- La conception et l'automatisation de traitements novateurs des données mesurées.

Notre synergie a l'ambition d'offrir au client la réactivité d'une seule structure lui permettant de disposer de toute une équipe pluridisciplinaire d'une dizaine d'ingénieurs.

Que vous soyez acteur dans le domaine de la mesure cherchant une solution complémentaire, ou une entreprise n'ayant pas la maîtrise de notre activité, vous avez la garantie que la solution fournie, technologique et humaine, sera en adéquation avec l'objectif défini.

"L'union fait la force" : notre synergie a fédéré des techniques et des hommes, grâce au partage des connaissances dans le respect et la confiance.

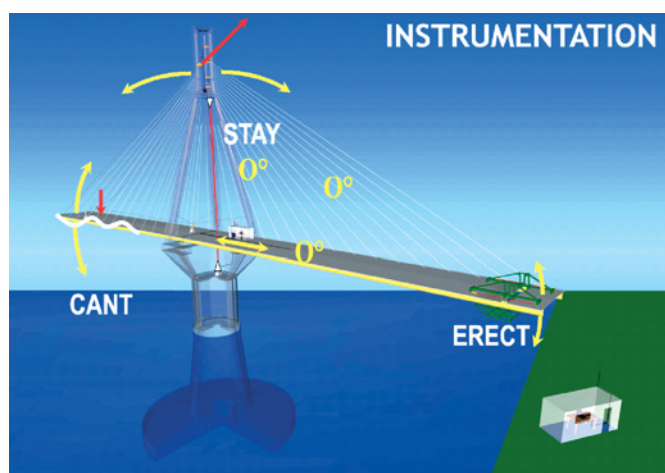
Un exemple de collaboration réussie :

L'inauguration du Pont Rion-Antirion en Grèce s'est faite avec 3 mois d'avance sur le planning prévisionnel, grâce, en partie, au travail méticuleux de préparation mené par une équipe pluridisciplinaire.

Sous la responsabilité du groupe Survey de VINCI, qui a adopté les procédures de réglages et le logiciel mis au point par FORMULE INFORMATIQUE, DYNAOPT et GEODESIE-INDUSTRIELLE SA ont développé une instrumentation origi-

nale pour fournir au logiciel de réglage, les données requises. Des capteurs spécifiques, innovants pour certains, ont dû être mis en œuvre là où les solutions plus traditionnelles n'étaient pas adaptées.

La clé du succès a été que des ingénieurs Design, Méthodes, "Survey", spécialiste en instrumentation et concepteur de logiciel d'aide à la construction, gardaient toujours à l'esprit les contraintes des autres disciplines.



Congrès Nottingham IWAA 2004

Figure INSTRUMENTATION : schématisation des paramètres mesurés selon 3 programmes :

- **ERECT** : mesure de l'angle entre le segment mis en place et son prédécesseur.
- **STAY** : mesures des déplacements pylône, des mouvements du tablier, de la tension dans le hauban et des températures dans la structure.
- **CANT** : mesures des mouvements des trois derniers segments du tablier, de la tension dans les haubans des trois derniers segments et poids des trois derniers segments. ●

Contacts

DYNAOPT

+33 1 41 79 13 00 - www.dynaopt.com

FORMULE INFORMATIQUE

+33 1 45 77 90 10

GEODESIE-INDUSTRIELLE SA

+41 22 341 12 73 - www.geodesie.com

HYP-ARC

+33 4 50 49 41 52 - www.hyp-arc.com

METRIDE

France : +33 4 72 08 77 77 - www.metrider.fr

Photothèque de VINCI



Pont Rion-Antirion en Grèce

COMMUNIQUÉ

GEOMEDIA SA

La Société et ses logiciels

Depuis sa création en 1993, GEOMEDIA SA est le principal partenaire d'Autodesk en France dans les domaines de la topographie, de la cartographie, de l'infrastructure (VRD – Voiries et Réseaux Divers) et du génie civil. En effet GEOMEDIA SA développe et commercialise les applicatifs COVADIS et AUTOPISTE qui se sont imposés comme les outils de référence dans le monde AutoCAD.

COVADIS est l'applicatif de topographie, de cartographie et d'infrastructure dédié aux géomètres, aux bureaux d'études, aux collectivités locales et aux entreprises de BTP. 8 800 licences COVADIS sont déjà installées chez 3 600 clients.

COVADIS
calcule et
dessine des
carrefours
giratoires
respectant
les normes
du SETRA



AUTOPISTE est l'applicatif de conception d'ouvrages linéaires (Routes, Autoroutes, TGV). Ses fonctionnalités complètent celles de COVADIS dans les bureaux d'études routiers, les entreprises de travaux publics et les administrations (DDE, SNCF, Conseils Généraux...). 1 200 licences AUTOPISTE sont actuellement exploitées en France.

Sa position actuelle sur le marché

Depuis le rachat de son concurrent PCVISION en 1999, GEOMEDIA SA est le leader du marché de la topographie et de l'infrastructure en France. Durant l'année 2005, GEOMEDIA SA a installé 1 250 nouvelles licences COVADIS. Cette forte croissance a été réalisée grâce à l'évolution permanente de COVADIS, à son intégration parfaite au moteur AutoCAD et à sa simplicité d'utilisation. ●

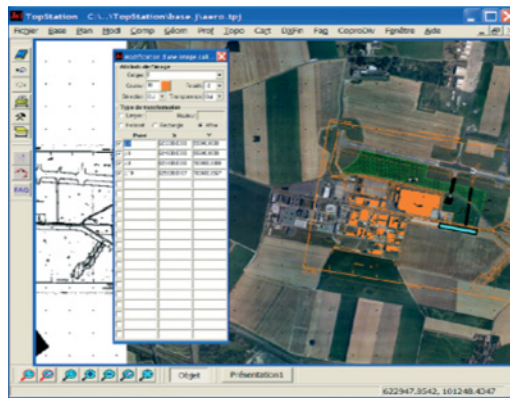
Contact

GEOMEDIA SA

Immeuble "La Vigie" - 20, quai Malbert
29200 BREST
Tél. : 02 98 46 38 39
Fax : 02 98 46 46 64
www.geo-media.com

JSINFO

la géomatique au service du géomètre



JSINFO, éditeur historique français de solutions logicielles à destination des géomètres, topographes et bureaux d'études TP et VRD, propose les solutions applicatives parmi les plus souples et les plus fiables du marché pour toutes les problématiques de calcul, production et gestion de données topométriques et cartographiques. Avec la solution TOPSTATION, JSINFO se positionne aujourd'hui parmi les leaders du marché des applicatifs destinés aux Géomètres Topographes.

Topstation du relevé de terrain... ...à la banque de données cartographiques

JSINFO s'est toujours efforcé d'apporter un regard novateur sur les besoins du métier en matière de traitement numérique des données. Prescripteur en matière de topométrie avec TOPOJIS, et bénéficiant d'une riche expérience dans le domaine de la gestion de données cartographique (ASCODES), JSINFO positionne aujourd'hui un produit alliant les facilités d'un outil DAO aux ouvertures d'un outil Géomatique : TOP-STATION. Parce que le Géomètre reste le principal producteur de données cartographiques à grande échelle, parce qu'il devra contribuer peu à peu à l'intégration de ces données dans des systèmes de gestion globalisée de la donnée (SIG...) tout en continuant d'en assurer une production et un suivi de qualité ; les outils de production de la donnée topographique devront intégrer "l'intelligence" au dessin.

Assurer un traitement cohérent de la donnée, depuis la mesure terrain jusqu'à son exploitation géomatique, voilà le challenge que JSINFO se propose de relever avec ses solutions. Des solutions simples, pour l'usage quotidien (Calcul, DAO, études...) Des outils intégrés assurant une liaison dynamique entre le dessin et la donnée littérale (DA Numérique, Copropriété...) Des développements avancés avec la mise en œuvre de BDTopo à l'échelle communale, voire départementale illustrant que la donnée topographique est partie intégrante de la géomatique de demain. JSINFO, résolument novateur, accompagne comme il l'a tou-

jours fait l'évolution du métier en restant proche des besoins immédiats du Géomètre.

Métier : Géomètre

Depuis sa création en 1973, JSINFO est spécialisé dans le développement de solutions adaptées à la profession de Géomètre. L'équipe constituée de Géomètres de formation a développé de nombreux partenariats avec les cabinets clients.

TOPOJIS, premier logiciel développé par JSINFO reste la référence en matière de calculs topométriques. Une expérience qui confère à la société une légitimité toute particulière dans le secteur et lui offre un regard aiguisé sur les besoins et les aspirations de la profession.

JSINFO consacre aujourd'hui l'essentiel de ses développements à la mise en œuvre d'outils applicatifs établis spécifiquement pour et avec des géomètres ... Les derniers en date concernent le traitement dynamique des divisions en lot de copropriété et le traitement numérique du D.A. Ces applicatifs permettent d'allier la puissance et l'ergonomie du traitement graphique numérique aux exigences qualitatives du métier (contrôles, cohérence du dessin et des données...). Ils assurent la fiabilité et l'efficacité d'un dessin numérique intelligent. ●

Contact

JSINFO

8, rue de la Maison Rouge 77185 LOGNES
jsinfo@jsinfo.fr

Leica Geosystems

tourné vers le futur et focalisé sur les attentes de ses clients

Aujourd'hui, le monde évolue de plus en plus vite, nous voulons tout et tout de suite, des solutions faciles à utiliser, de qualité, multifonctions et qui améliorent notre productivité pour être plus concurrentiels. Il en est de même pour les topographes qui veulent être plus flexibles, optimiser les moyens humains, gagner en productivité et minimiser les interruptions de leurs projets. Le temps devient un allié concurrentiel s'il est bien maîtrisé.

Des solutions et services basés sur l'évolution des attentes des topographes

C'est en restant orienté vers les besoins de ses clients que Leica Geosystems propose des solutions et services conçus pour répondre à leurs attentes et même, les anticiper et faire évoluer les méthodes de travail.



Soyez plus flexibles et optimisez vos moyens humains ...

... avec la station totale robotisée TPS1200, le topographe peut mener seul ses projets et, une fois formé sur l'utilisation de cette solution, peut aisément appréhender un GPS1200 ou la SmartStation, les programmes et interfaces étant communs et donc le temps de formation réduit !



Gagnez en productivité ...

... avec les solutions conçues pour optimiser l'utilisation d'un réseau de stations permanentes type TERIA ou Orphéon :

- la **SmartStation**, première station totale avec GPS intégré vous permet de rattacher instantanément et à moindre coût vos levés tout en oubliant les cheminements. L'histoire

avait commencé avec l'intégration d'un distancemètre dans un théodolite, la convergence continue...

- la nouvelle gamme GPS1200 GG qui ajoute les 17 satellites de la constellation russe GLO-NASS, permet au topographe de réduire les temps d'attente et donne plus de possibilités dans les zones masquées par des immeubles ou des arbres. Un investissement d'autant plus sûr que les GPS Leica sont déjà conçus pour accueillir la constellation de satellites Galiléo.



Minimisez les interruptions ...

... en bénéficiant des contrats de services de Leica Geosystems qui possède une organisation unique en France : une équipe de dix ingénieurs de vente répartis sur le territoire épaulée par deux ingénieurs dédiés à une hotline qui opère en continu de 8h00 à 19h00 du lundi au jeudi et de 8h00 à 17h00 le vendredi, deux ingénieurs formation et la proximité d'un réseau de distributeurs proposant la location, la maintenance et la vente d'instruments.

Leica Geosystems – Véritable acteur du monde de la topographie

Leica Geosystems reste tourné vers le futur et focalisé sur les attentes de ses clients pour être leader dans la mesure, la visualisation et l'édition de données géospatiales.

Leica Geosystems est un véritable acteur dans le monde de la topographie en participant notamment aux groupes de travail avec l'IGN, et, en tant que groupe international, est à même de comparer, relativiser et détecter les meilleures pratiques pour les faire partager à ses utilisateurs. ●

Contact

Leica Geosystems SARL

Parc du Saint-Laurent - Bâtiment le Québec
54, route de Sartrouville - 78232 LE PECQ Cedex
www.leica-geosystems.fr

TRIMBLE

Trimble est d'abord reconnue comme étant l'entreprise à l'origine de l'avènement du GPS en topographie. La famille Trimble s'est depuis agrandie avec la contribution du savoir-faire des Européens dans les systèmes innovants optoélectroniques et robotiques (Allemagne et Suède), Scanner Laser 3D (France) et informatique (Allemagne, France).

Trimble est depuis de nombreuses années le fer de lance de développement de solutions d'infrastructures modulaires pour la mise en place de réseaux de stations permanentes : ceux-ci se sont orientés vers les systèmes temps réel avec précision centimétrique et les solutions innovantes et de pointe de station virtuelle VRSTM de Trimble via sa filiale TerraSat (Munich) se sont imposées dans le monde entier pour satisfaire les demandes croissantes de ses clients. Poursuivant sa conquête des marchés, Trimble a créé des joint-ventures : Caterpillar dans le domaine de la construction CTCT (Caterpillar Trimble Control Technologies) et Nikon (Nikon-Trimble Co, Ltd).

Stratégie de l'innovation et l'intégration :

Au siècle dernier avec le 1^{er} distancemètre électronique pour la topographie, le 1^{er} système GPS temps réel, la 1^{re} station totale robotique, le 1^{er} récepteur 100 % sans câble à communication Bluetooth... Aujourd'hui, révolutionnaire, la 1^{re} station totale à induction magnétique (Trimble S6) ; les récepteurs GNSS Trimble NetR5, Trimble R8 GNSS, 1^{ers} systèmes de positionnement GNSS compatibles (L1, L2), L2C, L5 et Glonass (et WAAS et EGNOS), le tout concourant à plus de productivité, qualité des données, simplification d'utilisation, sécurité et retour sur investissement. Trimble sera bien sûr prêt pour les satellites Galileo dès que les signaux seront disponibles.

Le concept (datant de 1998) Trimble Integrated Surveying™



Trimble® IS® Rover

Topographie Intégrée : un seul contrôleur + un seul logiciel de terrain associant les données Optiques et GPS - ne cesse d'évoluer : exemple à ce jour de l'intégration de systèmes de positionnement GNSS temps réel et de mesures optiques avec le Trimble IS Rover. Ce concept Integrated Surveying™ atteint dorénavant un niveau supérieur avec le modèle Trimble Connected Survey Site - Chantier Topographique Connecté Trimble - qui inclut tous les éléments cruciaux d'une solution complète de topographie (produits de haute technologie, techniques, services et communications)

et les associe dans une solution totalement intégrée et interopérable, propre à chaque géomètre et à chaque chantier de topographie.

Le modèle du "Connected Survey Site" n'est pas un nouveau flux de travail de topographie. C'est au contraire la solution totale dont les géomètres bénéficient lorsqu'ils emploient presque n'importe quelle technologie, produit ou service de topographie proposés par Trimble. Cette nouvelle approche a pour but, sur un marché fortement concurrentiel, d'améliorer l'efficacité et par conséquent la rentabilité d'une activité de topographie. L'accès à cette solution avancée se fait très simplement. En employant ne serait-ce qu'une seule solution Trimble, les géomètres commenceront à apprécier le modèle "Connected Survey Site", avec des atouts tels que le traitement du flux de données et la réduction des temps d'apprentissage. De plus, les avantages procurés par la synergie du "Connected Survey Site" se développent de façon exponentielle au fur et à mesure que des éléments sont ajoutés.

Comme presque tous les produits de Trimble se connectent facilement à ce système, les géomètres pourront progressivement augmenter cette synergie. Et ils n'auront pas besoin de remplacer leur équipement initial pour apprécier de grands gains de productivité.

Comme dans l'exemple qui suit :

Supposons qu'un géomètre emploie un mobile « Trimble IS Rover » avec un contrôleur Trimble TSC2® (Produit de haute technologie). Capable de se connecter à un réseau local VRS d'infrastructure Trimble (Service), il peut alors choisir entre l'optique ou le GPS RTK sur le terrain (Technique), en décidant lequel sera utilisé, et à quel moment, sans avoir besoin d'investir dans une station de base individuelle. Grâce au TSC2 autorisant la connexion Bluetooth (Communications) par un modem GPRS au réseau VRS, le géomètre se retrouve au centre du "Connected Survey Site" de Trimble, en bénéficiant de l'intégration des quatre éléments pour une satisfaction et une réussite jusqu'alors inenvisageables.

Avec l'introduction du modèle "Connected Survey Site", Trimble réalise des avancées significatives pour résoudre les problèmes globaux auxquelles les géomètres sont aujourd'hui confrontés. En se concentrant sur les interconnexions et les interactions entre tous les composants d'une solution topographique totale, Trimble s'attaque aux aspects les plus sensibles de la topographie d'aujourd'hui et de demain. ●

Contact

Trimble France s.a.s.
32, rue de la Fontaine du Vaisseau
F- 94120 FONTENAY-SOUS-BOIS
www.trimble.com

Identification et cartographie des concentrations spatiales des accidents de la route

Application à la RN 11 (Ouest algérien)

■ Abdelkader MENDAS - Samir HAMDOUN - Hocine NECHNICHE

L'amélioration des conditions de sécurité des personnes qui utilisent la route chaque jour fait intervenir plusieurs facteurs, principalement l'infrastructure routière. Pour éviter les dégâts des accidents et assurer le confort des passagers, il faut tout d'abord connaître les causes réelles provoquant les accidents de la route puis identifier les lieux de concentration spatiale des accidents de la route sous la forme de zones noires pour, finalement, prendre les meilleures décisions.

Cette identification requiert l'utilisation de méthodes statistiques adéquates pour avoir des diagnostics fiables. Les systèmes d'information géographique (SIG) sont de plus en plus utilisés pour mettre en place des outils de suivi et de gestion locale de la sécurité routière. Dotés de modules relatifs à la segmentation dynamique capable d'associer un ensemble d'attributs à un objet linéaire sans changer sa description géométrique, ils sont apparus nécessaires pour la cartographie des zones noires. L'application de la méthode à un tronçon de la Route Nationale RN11 montre son adéquation au problème de la localisation des zones noires.

■ mots-clés

Accidents routiers,
Analyse spatiale,
Statistiques spatiales,
SIG

L'augmentation du nombre des véhicules liée aux besoins de déplacement des personnes et au développement des échanges économiques a entraîné une accélération sans précédent du trafic, c'est pourquoi des infrastructures routières ont été conçues et des moyens nécessaires à leur maintenance doivent être mis en place. En parallèle des avantages de la voiture, nous trouverons de véritables problèmes socio-économiques, dans tous les pays du monde, qui sont les accidents de la route.

Pour résoudre ces problèmes, au niveau de l'infrastructure routière, il faut tout d'abord identifier les lieux dangereux du réseau routier. Cette identification se fait couramment par l'utilisation de l'approche par points noirs. S'inspirant des travaux de Flahaut B. (2000), les points

noirs sont des segments de route (d'une longueur de 100 mètres) qui comptabilisent au moins trois accidents avec lésions pendant une année. Ce procédé ne tient pas compte de la migration des accidents au cours du temps et l'identification n'est que ponctuelle. Pour une identification plus satisfaisante, les endroits de concentration spatiale des accidents de la route peuvent être représentés sous forme de zones noires Flahaut B. (2000). L'utilisation d'une méthode d'analyse spatiale basée sur des mesures locales d'autocorrélation spatiale permet la localisation de ces zones noires.

Ainsi, le réseau est décomposé en unités d'un hectomètre de longueur (assimilé à une entité ponctuelle) ; c'est la plus petite unité spatiale pour laquelle les données d'accidents sont disponibles. Les zones

noires sont constituées de plusieurs hectomètres et définies comme des tronçons de route caractérisés par une concentration élevée d'accidents.

L'objectif principal de cette étude est de définir les zones dangereuses (zones noires), montrer si une zone est statistiquement plus dangereuse qu'une autre, déterminer sa longueur et enfin, cartographier les zones noires par l'utilisation d'un SIG. Ainsi, ce sont les possibilités d'analyses statistique et spatiale, pour l'identification des concentrations spatiales des accidents routiers, qui seront explorées. Les SIG, outils puissants en matière d'analyse spatiale pour aider à la gestion et à la prise de décision, seront exploités pour la gestion des réseaux routiers et en particulier pour la cartographie des zones noires.

■ ■ ■

■ Accidents routiers

L'explication du nombre et des victimes d'accidents de la route est une tâche très difficile, voire impossible. Les accidents résultent principalement de l'interaction de trois éléments fondamentaux à savoir le véhicule, le conducteur et l'infrastructure routière.

L'analyse des données sur les accidents, cas de la Wilaya d'Oran, illustrés sur le tableau I montre que, souvent, la combinaison du comportement dynamique du véhicule et la capacité du conducteur à maîtriser la situation critique produit l'accident.

Il est donc essentiel que les infrastructures et leur environnement soient conçus de façon à ne pas imposer aux usagers de difficultés excessives et à leur permettre de percevoir clairement les exigences auxquelles ils doivent adapter leur conduite, en évitant que la route ne présente aucune apparence trompeuse et ne constitue en aucun cas un piège auquel l'utilisateur se laisse prendre (Hamzaoui O, 1996).

Approche méthodologique

La meilleure façon de réaliser une approche à long terme, sur des bases scientifiques, pour la mise en œuvre

d'un système de trafic routier plus sûr, est de s'attaquer aux causes qui sont à l'origine des accidents, en éliminant les zones de conflit ou en les rendant maîtrisables par les usagers de la route.

Pour ce faire, on dispose de plusieurs approches. La plus traditionnelle est celle de l'analyse des accidents sur leurs emplacements (points noirs, itinéraires noirs et zones noires) : on cherche des similitudes entre les caractéristiques des accidents. Il faut ensuite trouver comment améliorer la conception routière afin d'éliminer ces accidents.

Selon (Slop, 1993) l'approche dite des "zones noires" est très efficace. Ces zones dangereuses (zones noires) sont définies en se basant sur des éléments statistiques. Il est à déterminer, statistiquement, le degré de dangerosité, définir la longueur à attribuer à chaque zone et voir si elle est unique ou variable d'une zone à l'autre.

A cet effet, on utilise des mesures de dangerosité basées sur l'autocorrélation spatiale dont les indices permettent de mesurer la dépendance/association spatiale entre les valeurs x_i prises par une même variable X en des lieux caractérisés par une certaine proximité spatiale (Thomas I., 1996).

■ Analyse spatiale

L'expression "analyse spatiale" recouvre un ensemble de théories et de méthodes de recherche qui étudient la répartition et l'organisation d'objets localisables.

Cette localisation se fait par l'intermédiaire d'une géoréférence, d'un géocodage, qui permet d'assigner une localisation à un objet dans un système de référence géographique précis, ou à un ensemble d'objets dans un système commun.

L'analyse spatiale permet, en particulier, de localiser l'endroit dans l'espace où se produira un phénomène, étudier la dimension spatiale et la localisation de plusieurs phénomènes à la fois et comparer les différents attributs des lieux étudiés entre eux, dans la mesure où ces lieux sont comparables et enfin de décider et prévoir à partir des modèles construits et des simulations permettant de tester les qualités comparatives des différents scénarios.

■ Statistiques spatiales

Pris dans son sens méthodologique le plus large, ce terme désigne toute analyse utilisant l'outil statistique et ayant une dimension spatiale qui concerne l'outil proprement dit, l'objet analysé ou les variables utilisées comme descripteur de cet objet. Différentes combinaisons sont possibles :

- Seul l'objet est spatial ;
- Objets localisés et variables spatiales ;
- Objets localisés et outils statistiques spatiaux.

Pour l'étude de l'accidentologie routière, la première étape consiste à étudier la concentration spatiale des accidents de la route, plus précisément à identifier les zones de concentration spatiale d'accidents, ou zones noires (zones dangereuses).

Parmi les méthodes les plus utilisées, se trouve l'autocorrélation spatiale. Elle fait intervenir les objets localisés et les outils statistiques spatiaux.

■ Méthode d'autocorrélation spatiale

Les mesures d'autocorrélation spatiale se fondent sur l'hypothèse que ce qui se passe en un lieu géographique

Tableau I : Bilan d'accidents au niveau de la Wilaya d'Oran.

(Source : Escadron de la sécurité Routière de la Gendarmerie Régionale - Oran)

Causes	1999	2000	2001	2002
Liées aux véhicules	40	61	62	32
Dépassement dangereux	66	73	69	105
Arrêt dangereux	14	0	12	10
Excès de vitesse	141	193	266	115
Conduite en état d'ivresse	36	43	69	28
Non-respect du code de la route	6	0	1	11
Refus de priorité	78	43	19	44
Chaussées défectueuses	4	0	3	5
Défaut de signalisation	1	0	0	0
Divagation d'animaux	4	0	0	2
Mauvaises conditions atmosphériques	10	25	20	14
Autres causes	119	95	55	178

donné dépend de ce qui se passe dans les lieux voisins. Elles prennent en compte la position relative des lieux les uns par rapport aux autres (deux lieux proches se ressemblent-ils plus que deux éloignés ?).

Selon Flahaut B. (2000) les indices d'autocorrélation spatiale permettent de mesurer la dépendance/association spatiale entre les valeurs x_i prises par une même variable x , nombre d'accidents par hectomètre de route, en des lieux caractérisés par une certaine proximité spatiale. Le choix de la longueur est un aspect important à prendre en compte, d'après Thomas (1996), le choix de la longueur des tronçons de route influe sur les mesures statistiques liées au nombre et à la densité des accidents.

■ Choix de la méthode de l'autocorrélation spatiale

Selon Tobler (1970) : "everything is related to everything else, but near things are more related than distant things" Si les valeurs x_i , prises par une même variable x en différents lieux i , sont interdépendantes dans l'espace, on dit alors que les données sont autocorrélées spatialement (Cliff & Ord, 1981). L'estimation de l'association/dépendance/corrélation spatiale entre les valeurs d'une même variable en différents endroits de l'espace, plus ou moins proches les uns des autres, peut se faire par des mesures d'autocorrélation spatiale. Getis (Ord & Getis, 1995) a déjà démontré la relation entre l'interaction spatiale et l'autocorrélation spatiale.

Les lieux présentant des relations par rapport à la proximité spatiale et la ressemblance ou l'opposition entre les valeurs d'une même variable en différents endroits de l'espace étudié peuvent se mettre en évidence par les indices d'autocorrélation spatiale.

Ainsi, pour l'identification des zones noires sur un réseau routier, sachant que l'hectomètre constitue la plus petite unité spatiale à laquelle les accidents sont localisés, il s'agit de regrouper des hectomètres voisins en zones dangereuses et des zones non dangereuses (Flahaut B., 2000).

Ainsi, grâce à l'autocorrélation spatiale (mesure d'un indice de dangerosité de tronçons routiers), peuvent être indiquées la longueur des zones et l'intensité du caractère dangereux de la zone.

■ Indices de l'autocorrélation spatiale

D'après Upton & Fingleton (1985), l'indice de Moran, donné par la formule (1), est souvent préféré à celui de Geary, pour estimer si l'ensemble des lieux appartenant à la région d'étude présente de l'autocorrélation spatiale.

$$I = (n/S_0) \left(\sum_i \sum_j w_{ij} z_i z_j / \sum_j z_j^2 \right) \quad (1)$$

Où W_{ij} : pondérations reflétant les relations de proximité.

$$x_i : \text{valeur de la variable } x \text{ au lieu } i$$

$$S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij} \quad (2)$$

$$x_j : \text{valeur de la variable } x \text{ au lieu } j$$

$$z_i = x_i - \bar{x} \quad (3)$$

$$\bar{x} : \text{valeur moyenne des } x_i$$

$$z_j = x_j - \bar{x} \quad (4)$$

n : nombre de lieux.

Un indice négatif traduit une autocorrélation spatiale négative. Cette dernière est le résultat d'une association de valeurs opposées, c'est-à-dire le produit d'une valeur négative pour le lieu i , et d'une valeur positive pour son voisinage, ou inversement. Un indice positif traduit une autocorrélation spatiale positive, déduite d'une association de valeurs similaires.

Sachant que l'objectif principal de cette étude est l'identification des zones noires, nous nous intéressons seulement au cas du produit de deux valeurs positives. En effet, une zone noire est formée d'un ensemble d'hectomètres proches présentant un nombre élevé d'accidents. Ainsi, pour identifier les zones noires et évaluer l'indice de dangerosité, seuls les indices locaux positifs déduits du produit de deux valeurs positives sont retenus.

■ Pondération

Pour évaluer les coefficients de pondération, il est nécessaire d'intervenir le niveau de contiguïté (nombre de voisins de chaque lieu ou distance de voi-

sinage) et la valeur des poids attribués à chacun d'eux (Anselin L., 1995).

Pour évaluer le nombre optimal de voisins, il faut effectuer pour chaque hectomètre de la route une analyse systématique et exploratoire. Ainsi, en se basant sur les travaux de Flahaut B. (2000) pour calculer les indices locaux d'autocorrélation spatiale, on utilise des tronçons de longueurs variant de 300 à 2 100 mètres d'un pas de 200 mètres (c'est-à-dire le nombre de voisins varie de 2 à 20, répartis de façon symétrique de part et d'autre de l'hectomètre central). Le nombre optimal de voisins correspond à la valeur maximale de l'indice local d'autocorrélation spatiale. Cette valeur est le produit de deux valeurs positives (les plus élevées) relatives à un hectomètre et à ses voisins.

Selon Cliff et Ord (1981) et Haining (1990), il existe plusieurs possibilités pour déterminer la valeur des pondérations. Ici, sont pris en considération des poids qui sont fonction de la distance au lieu considéré. La fonction de décroissance des pondérations avec la distance "dij²" est choisie du fait qu'elle maximise l'indice moyen d'autocorrélation spatiale locale. Elle traduit une forte association entre les nombres d'accidents observés dans les zones noires. "Cette constatation est en cohérence avec la littérature relative à l'interaction spatiale qui considère généralement que les relations spatiales entre lieux sont décroissantes avec l'inverse du carré de la distance" (Flahaut B., 2000 : p 12).

Traitement de données et résultats

Les données prises en compte ne concernent que les accidents avec lésions corporelles qui nécessitent l'intervention des services de la gendarmerie et qui sont en principe répertoriés.

Dans la Wilaya d'Oran, est relevé un chiffre d'environ 465 accidents par année en moyenne, et 1 859 accidents sur 3 ans et demi durant la période de septembre 1999 à février 2003 selon l'escadron de la sécurité routière de la gendarmerie régionale d'Oran.

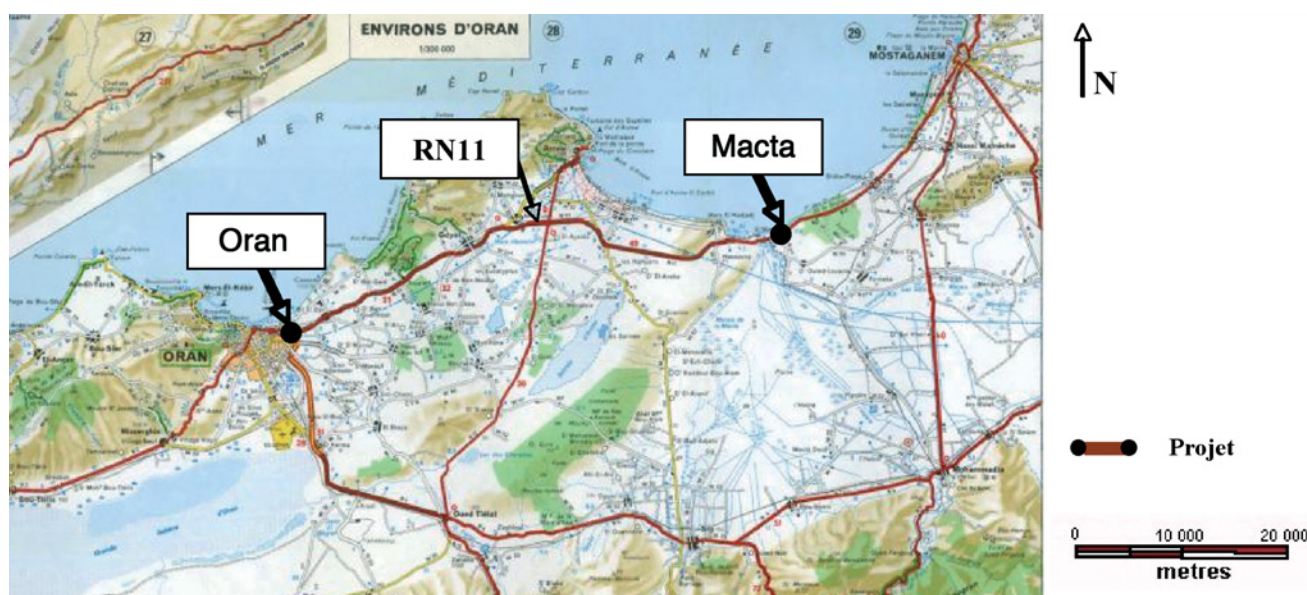


Figure 1 : Situation de la zone d'étude.

(Source : Carte Michelin éd. des voyages, 2003 - 1st ed. - 1:1 000 000 - (Michelin / National ; 743). Cartons : "Environs d'Oran" à 1:300 000

■ Sur les 4 430 hectomètres de la RN11, seuls 630 sont retenus (disponibilité de données). Au cours de cette période, 252 accidents ont été enregistrés. Le nombre moyen d'accidents par hectomètre est donc de 0.4.

La numérotation du réseau de route nous a facilité la localisation de l'accident par rapport à la borne kilométrique (point kilométrique) la plus proche, soit avec une précision de 100 mètres afin de pouvoir affecter un nombre d'accidents à chaque hectomètre de la route. Le tronçon concerné par cette étude fait partie de la RN11, il relie la ville d'Oran et la Macta (voir Fig. 1).

Au cours de cette étude, a été réalisé un programme appelé ICSAR (Identifica-

tion des Concentrations Spatiales des Accidents de la Route) pour calculer l'indice d'autocorrélation spatiale, l'indice de dangerosité et identifier la concentration spatiale des accidents de la route. Son application nécessite des données sur les accidents, la longueur de la zone d'étude, le nombre de voisins qui peut être traduit par une longueur et l'exposant pour les fonctions de décroissance.

La figure 2 représente l'indice d'autocorrélation globale en fonction de l'exposant de la fonction de pondération dij pour chaque longueur de la zone noire. L'association du nombre d'accidents entre un hectomètre i et ses voisins est très souvent plus intense avec ses voi-

sins immédiats ou ceux les plus proches. On remarque que la décroissance de l'indice global est plus importante avec un exposant de dij plus proche de zéro et on constate que l'indice global se regroupe entre 0.2 et 0.3 pour un faible exposant qui est de -2 (voir Fig. 2).

Sur ce graphe apparaît clairement la variation de l'indice global d'autocorrélation spatiale en fonction de la longueur des zones noires. De même, on remarque que, pour un nombre donné de voisins, l'indice global augmente lorsque l'exposant de dij diminue, et que cette croissance est d'autant plus prononcée que le nombre de voisins est grand. La figure 3 montre qu'à chaque

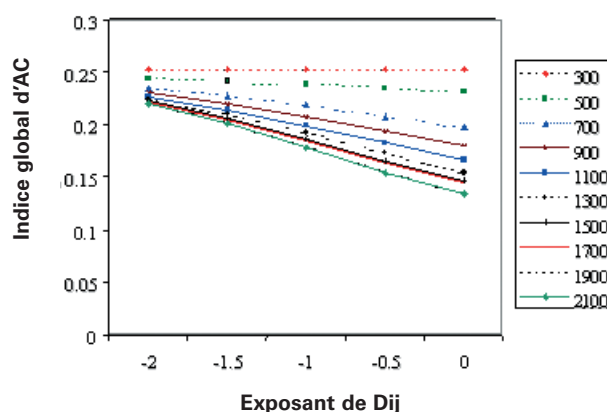


Figure 2 : Variation de l'indice global selon les fonctions de décroissance des pondérations dij.

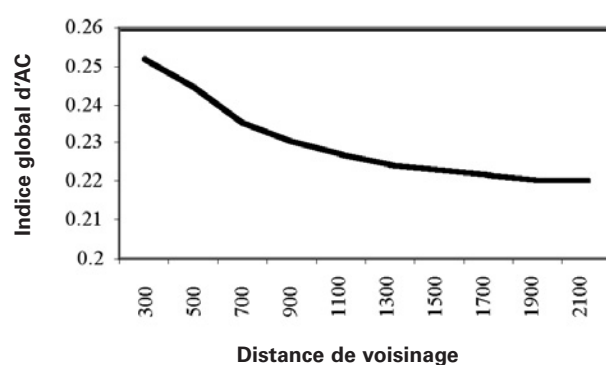


Figure 3 : Variation de l'indice global d'autocorrélation spatiale en fonction de la distance de voisinage (cas de dij⁻²).

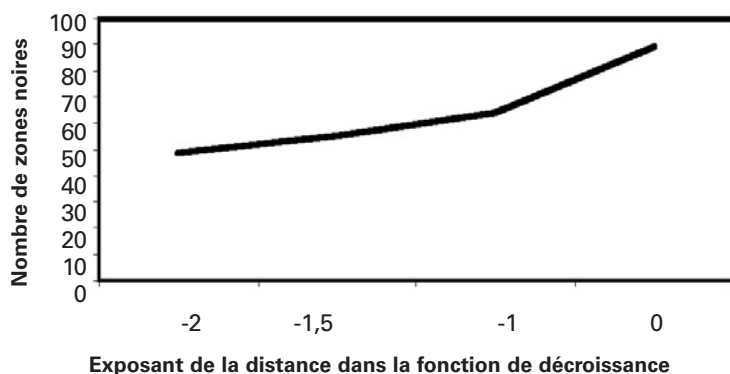


Figure 4 : Variation du nombre de zones noires en fonction de dij.

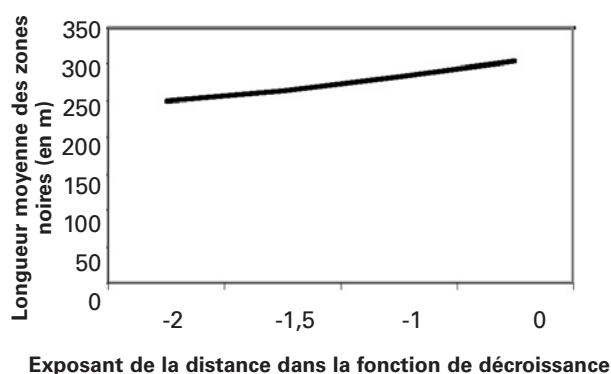


Figure 5 : Variation de la longueur moyenne des zones noires en fonction de dij.

fois la longueur de la zone noire augmente, l'indice d'autocorrélation global diminue. Le choix de la longueur adaptée à la structure spatiale locale et l'influence de la fonction de décroissance des pondérations avec dij sur la détermination des zones noires ont été étudiés dans cette étude.

En choisissant des exposants de dij de plus en plus petits, on peut observer une diminution du nombre de zones noires identifiées (voir Fig. 4) et une diminution de leur longueur moyenne (voir Fig. 5).

En utilisant un exposant plus faible, on remarque une diminution du nombre de zones noires identifiées par rapport au cas d'un exposant plus grand (ce sont les plus longues qui ne sont plus identifiées). La longueur de ces zones est en moyenne plus petite et leur indice de dangerosité est élevé. Quant à la valeur moyenne de l'indice local d'autocorrélation spatiale (proportionnelle à l'indice global de l'ensemble des zones noires), elle augmente lorsque l'exposant de la distance diminue. Ce sont donc les zones noires les moins significatives qui ne sont plus identifiées en diminuant l'exposant de dij.

Les systèmes d'information géographique, par le biais du module Network Analyst du logiciel ArcView PC version 3.2 d'ESRI (ESRI, 1996) utilisé pour l'exploration des fonctions d'analyse spatiale, ont facilité la cartographie des zones noires de la RN11 (voir Fig. 6).

Le module Network Analyst offre aux utilisateurs les fonctionnalités d'analyse

de réseaux linéaires. Il permet de résoudre de nombreuses problématiques liées à des données de dimension linéaire dans différents domaines. Il est doté d'une fonction de segmentation dynamique qui a permis la représentation des zones noires sur le réseau routier. La segmentation dynamique, en utilisant la notion d'abscisse curviligne, a la capacité d'associer un ensemble d'attributs à n'importe quel segment linéaire sans changer sa description géométrique c'est-à-dire sans segmenter ou casser le dispositif linéaire avec des pseudo nœuds. Elle repose sur la notion de route, section et événement. Ce dernier peut être ponctuel, linéaire continu ou linéaire discontinu (cas de zones noires).

Les zones dangereuses sont identifiées avec des pondérations proportionnelles à dij^{-2} et classées en 3 catégories. Les zones noires les moins dangereuses ne sont pas représentées sur la carte de façon à mieux visualiser les zones noires les plus dangereuses. L'ensemble des lieux pour lesquels les mesures locales d'autocorrélation spatiale sont effectuées est constitué des hectomètres caractérisés par au moins un accident. Les hectomètres sans accident n'interviennent pas dans les mesures.

Conclusion

La détermination de l'indice de dangerosité, calculé en fonction des indices d'autocorrélation spatiale, a permis l'identification des zones dangereuses

sur une partie de la route nationale RN11 (Oran-Macta).

Ces indices sont proportionnels au nombre moyen d'accidents par hectomètre. Le choix d'un exposant (fonction de décroissance des pondérations avec la distance) faible a permis de limiter le nombre et la longueur des zones noires identifiées. La classification des zones noires selon leur indice de dangerosité permet de connaître les plus dangereuses afin de s'intéresser à leur aménagement. Le programme ISCAR, réalisé au cours de cette étude, nous a beaucoup facilité le calcul des indices d'autocorrélation et de dangerosité. Il est facile à manipuler et donne des résultats jugés satisfaisants.

Vu la grande superficie du pays et par conséquent le réseau routier national par rapport à la zone traitée et le nombre de zones noires identifiées (63 km, 16 zones noires), imaginons le nombre de zones noires sur l'ensemble du réseau routier.

Les systèmes d'information géographique, par leur puissance d'analyse spatiale, se montrent des outils nécessaires pour une gestion rationnelle d'un réseau routier et un moyen d'aide à la prise de décision. Dans ce sens, l'utilisation de la segmentation dynamique disponible au niveau du module Network Analyst, dédié principalement à la gestion des réseaux, a donné pleine satisfaction.

Enfin, une fois les zones noires délimitées, les organismes compétents peuvent, voire doivent se concentrer sur les premières zones noires classées plus dangereuses pour les traiter et les aménager. ● ■ ■ ■

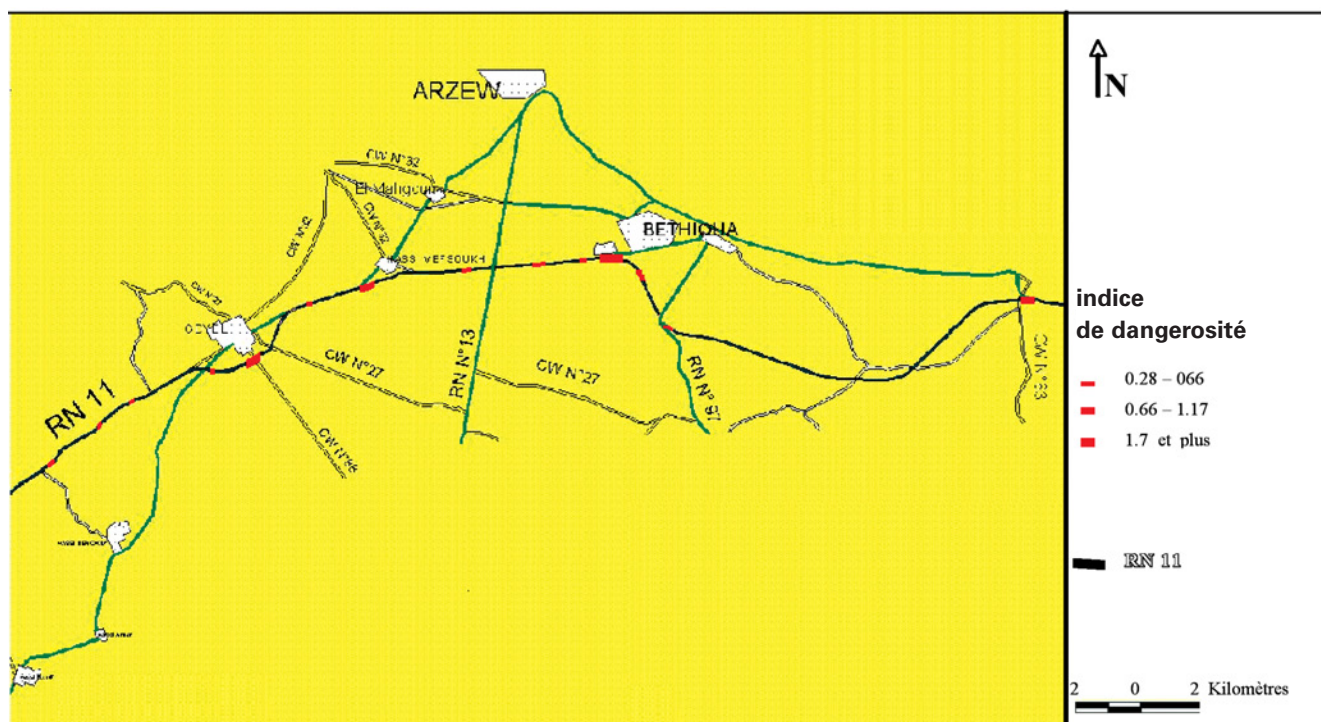


Figure 6 : Représentation des zones noires.

■ ■ ■ Contacts

**Abdelkader MENDAS - Samir HAMDOUN
- Hocine NECHNICHE**

CNTS, Division de Géomatique
BP 13, Arzew 31200, Oran, Algérie
Tél. (213) 41472217
Fax. (213) 41473665
mendask@yahoo.fr

Références bibliographiques

ANSELIN L., 1995. *Local Indicators of Spatial Association - LISA*. Geographical Analysis, 93-115.
CLIFF A.D. and ORD J.K., 1981. *Spatial processes : Models and applications*. London - Pion, 266 p.
Escadron de la sécurité routière de la gendarmerie régionale d'Oran, 2002. *Données statistiques sur les accidents routiers au niveau de la wilaya d'Oran*.
ESRI, 1996. *ArcView GIS : The Geographic Information System for Everyone*. GIS by ESRI, Using ArcView. Environmental Systems Research Institute, Inc., 349 p.
FLAHAUT B., 2000. *Influence de l'aménagement du territoire sur la sécurité routière durable : analyse de la*

situation belge. Rapport de recherche inédit, Louvain la neuve, 54 p.

HAINING R., 1990. *Spatial data analysis in the social and environmental sciences*. Cambridge, University press, 409 p.

HAMZAOUI O., 1996. Réalité de la prévention et de la sécurité routière en Algérie. 2^e Congrès Algérien de la Route, 156-163.

ORD J.K. & GETIS A., 1995. *Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and applications*. Geographical analysis, 286-306.

SLOP M., 1993. *Low-cost engineering measures to improve road safety in Central and Eastern European Countries*. A-93-25, SWOV, Leidschendam.

THOMAS I., 1996. *Spatial data aggregation: exploratory analysis of road accidents*. Accident Analysis and Prevention, 251-264.

TOBLER W.R., 1970. *A computer movie simulating urban growth in the Detroit region*. Economic Geography, Supplement, 234-240.

UPTON G. & FINGLINGTON B., 1985. *Spatial data analysis by example*. New York, Wiley.

ABSTRACT

Keywords: Road accidents, Spatial analysis, Spatial statistics, GIS.

The improvement of security conditions of persons using the road every day makes use of several factors, mainly the road infrastructure. To avoid damages caused by accidents and to assure the comfort of passengers, it is necessary to know the real reasons provoking accidents of the road then to identify places of spatial concentration of the road accidents in black zones to take, finally, the best decisions. This identification requires the use of adequate statistical methods to establish best diagnoses. Geographical information systems (GIS) are used to put in place tools of follow-up and local management of the road security. Doted of modules relative to the dynamic segmentation able to associate a set of attributes to a linear object without changing its geometric description, they appeared necessary for the cartography of black zones. The application of the method to a section of the National Road RN11 shows its adequacy to the problem of the black zones localization.

Détection entièrement automatique de points de fuite dans des scènes architecturales urbaines

■ Mahzad KALANTARI, Franck JUNG

En photogrammétrie architecturale ainsi que dans les programmes de levers urbains 3D qui prennent de plus en plus d'importance actuellement, nous recherchons des solutions permettant de faciliter la mise au point sur le terrain du tableau d'assemblage et de l'aérotiangulation de la façon la plus automatique possible. Or dans ce genre de chantiers il est clair qu'on peut tirer parti des perspectives formées par les droites parallèles de l'objet photographié et des points de fuites qui en résultent sur les images. Mais pour que l'opération soit efficace ces points de fuite doivent être retrouvés sans intervention humaine, problème qui jusqu'ici n'a pas été résolu de façon pleinement satisfaisante. Suite à nos travaux, il est présenté ici une nouvelle méthode de détection de points de fuite complètement automatique, robuste et de complexité réduite vis-à-vis des algorithmes classiques, qui tient en deux étapes : une détection de segments par un algorithme de Canny-Deriche modifié, suivie d'une caractérisation de chacun des segments par leur appartenance à un cercle spécifique de l'espace original. La bonne performance en termes de robustesse se double donc d'une réduction de complexité puisque l'ensemble du processus est réalisé en 2D sans aucune aide externe.

■ mots-clés

Patrimoine architectural, détection automatique de points de fuite, cercles K, photogrammétrie architecturale.

Les programmes de levers urbains 3D sont actuellement au centre de nombreuses recherches, avec comme objectif général de permettre une reconstitution la plus automatisée possible de la volumétrie des bâtiments, tout en plaquant ensuite sur les façades les images orthorectifiées issues d'acquisitions photographiques classiques obtenues au niveau de chaque rue. Lorsque ce problème est abordé avec les outils de la photogrammétrie, il s'avère très important de pouvoir garantir, dès la phase d'acquisition de terrain, que les images acquises permettent bien une restitution complète, et donc que le tableau d'assemblage résultant est satisfaisant. Et dans la même logique, il est recherché toute solution permettant de garantir la qualité de l'aérotiangulation et la possibilité de la réaliser sur le terrain. Parmi les différentes voies possibles, nous avons étudié comment rechercher les points de fuite dans les images. Les points de fuite sont en effet caractéristiques des images d'objets fabriqués par l'homme, tout particulièrement les bâtiments, dans lesquels la quasi-totalité des lignes visibles sur des images correspondent à des éléments strictement horizontaux ou verticaux. Ces directions spécifiques peuvent donc être employées pour faciliter l'orientation des images, pour autant qu'on sache les y retrouver de façon simple. Dans la géométrie conique caractéristique de la vision humaine ou de la photographie, ces lignes parallèles se traduisent par des faisceaux de droites qui concourent sur des points de fuite. Classiquement, un bâtiment isolé simple donne lieu à 3 points de fuite, celui lié aux lignes verticales, et

un pour chaque groupe de lignes horizontales dans chaque façade visible. Le but de ce papier est la production d'un nouvel algorithme permettant la détection automatique de tous les points de fuite engendrés par les lignes visibles dans une image 2D. Nous débutons dans la partie 2 par un état de l'art de la détection des points de fuite qui montre un ordre de complexité élevé des algorithmes mis en jeu et un manque de robustesse à toutes les situations de l'architecture urbaine.

La méthode proposée repose sur deux parties. La partie 3 présente une première détection des contours par une adaptation du filtrage de Canny-Deriche qui associe à chaque segment trouvé un ensemble de paramètres qualifiant son incertitude. La partie 4 utilise cette information en entrée pour établir le classement des segments selon le point de fuite afin de localiser ensuite facilement celui-ci. Une validation visuelle des résultats obtenus est finalement présentée et discutée.

Etat de l'art

Il existe à ce jour différentes méthodes pour la détection des points de fuite. Une des plus importantes est basée sur l'emploi de la sphère de Gauss, avec une grande diversité de variantes depuis son introduction par Barnard [2] en 1983. L'avantage de cette méthode est de ramener dans un espace fini tous les points de fuite. Cette approche a été complétée en 1984 par Magee et Aggarwal [11] qui accumulent la projection

■ ■ ■

- de l'intersection des segments de l'image sur la sphère de Gauss. Cette méthode est très lourde au niveau des calculs mais considérée comme très précise. Elle procède d'un calcul qui intervient dans l'espace 3D de la sphère de Gauss.

En 1998, Lutton et al. [10], proposent une nouvelle approche qui est une adaptation de la transformée de Hough pour la détection des points de fuite. Tuytelaars [14] introduit peu après une méthode interactive basée également sur la transformée de Hough, sous le nom de "Cascade HoughTransform". D'autres méthodes n'utilisent pas d'espace fini d'accumulation, et travaillent directement sur l'image. C'est le cas de Quan et Mohr [13] ou Den Heuvel [9] qui ont introduit une méthode de détection basée sur des contraintes géométriques. Brauer et Voss [4] s'intéressent à la détection des points de fuites dans des images où le niveau de bruit est élevé. Récemment, Almansa [1] a développé une nouvelle méthode de détection de points de fuite qui ne nécessite aucune information a priori, mais utilise des modèles probabilistes complexes.

Notre démarche consiste à détecter de façon automatique les points de fuite dans l'espace image sans avoir recours à des espaces finis 3D, en se basant sur une géométrie simple 2D.

Détection des segments droits sur l'image

Les segments sont extraits en utilisant une approche classique. Le travail est réalisé sur une image de luminance. Pour commencer, une détection des contours est réalisée par un filtre de Canny-Deriche [6]. Ensuite, une détection des maxima locaux dans la direction du gradient est effectuée. Une localisation subpixelaire de ces maxima est réalisée en utilisant une technique d'interpolation décrite dans [12]. Cette étape est suivie d'un seuillage par hystérésis à deux paramètres ($S_b=5$, $S_h=10$). Ces seuils sont pris suffisamment bas (à la limite de la distinction visuelle) afin de ne pas constituer des seuils critiques dans cet algorithme. Expérimentalement, aucun problème de détection n'a pu être observé en utilisant ces seuils. Ces contours sont chaînés. Une approximation polygonale des contours est réalisée. La polygonisation est réalisée en utilisant une fusion itérative basée sur le résidu maximum de la régression orthogonale. On fusionne d'abord les polygones dont la fusion fournit un résidu maximum minimal. L'algorithme de fusion est stoppé dès que le résidu maximum dépasse un seuil fixé. Dans nos applications et compte tenu de notre souhait d'utiliser les segments de droites dans des processus d'estimation de points de fuites ainsi que dans un processus d'orientation des images, nous avons choisi un seuil très bas : 0.5 pixels.

Cette étape de polygonisation est suivie par une estimation des paramètres de la droite ainsi que de la matrice de variance covariance de ces paramètres. L'algorithme utilisé est décrit dans [5]. Notons qu'aucun de ces paramètres ne semble critique pour la démarche proposée. Il est même possible d'en estimer certains (seuil de polygonisation) en fonction du rapport signal sur bruit de l'image ainsi que du paramètre α du filtre de Canny-Deriche.

Classification des segments par groupes de gerbes perspectives

■ Caractérisation des segments extraits de l'image

Chaque segment peut être caractérisé de nombreuses façons différentes, par exemple par les coordonnées de ses points d'extrémité, mais il nous a semblé plus adapté de les caractériser par leur distance à l'origine du système de coordonnées, et par l'angle formé par la direction de la droite orthogonale au segment et l'un des axes.

Pour des raisons pratiques, l'origine O a été choisie dans le coin supérieur gauche de l'image, l'axe des x étant horizontal et l'axe des y sur la verticale gauche, le repère ainsi formé n'étant donc pas de sens direct, mais chaque pixel recevant ainsi des coordonnées positives. L'angle θ est compté par rapport à l'axe x (voir figure 1). Nous désignons par la lettre H l'intersection entre la droite orthogonale issue de O au segment considéré et ledit segment.

Dans un premier temps, nous avons analysé visuellement l'histogramme formé par l'ensemble des θ de tous les segments. Un tel histogramme (cf. Figure 2) montre bien les différents groupes issus des gerbes perspectives correspondant aux différents points de fuite de l'image.

Néanmoins, si cet histogramme permet d'isoler sans aucune ambiguïté les lignes correspondant aux verticales (cf. Figure 2) pour autant que la photographie ait été acquise avec un axe plus ou moins horizontal, par contre les gerbes perspectives correspondant aux lignes horizontales des bâtiments se mélangent au moins en partie, sans qu'il soit possible de les séparer sur ce seul critère de θ .

Il suffit pour s'en persuader de prendre l'exemple de lignes horizontales du bâtiment localisées près de l'horizontale issue du centre optique : dans cette zone de l'image, deux gerbes perspectives correspondant à deux façades contiguës d'un même bâtiment sont nécessairement mélangées. Au-delà de cet exemple qui est assez ponctuel (zone de l'image limitée au voisinage de l'horizontale issue de l'axe optique), on trouve sans difficultés de nombreux groupes de segments parallèles appartenant à deux gerbes perspectives différentes, et qui rendent une discrimination sur le seul θ assez largement inopérante.

D'autres critères de sélection ont donc été recherchés. Nous nous sommes intéressés ici à une discrimination basée sur les

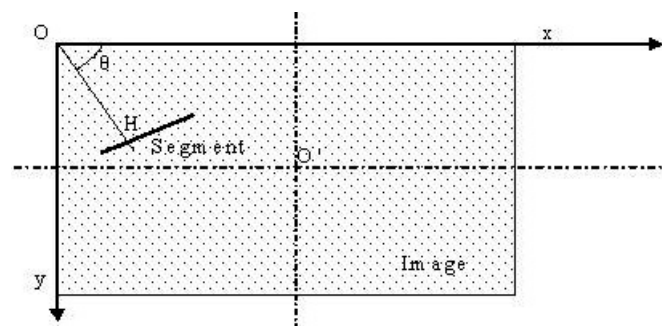


Figure 1 : Référence adoptée pour l'étude des points de fuite.

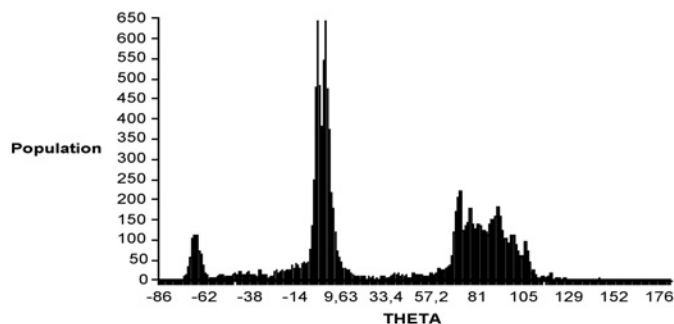


Figure 2 : Une image de segments, et son histogramme des orientations θ .

points H. En effet, pour deux segments parallèles appartenant à deux gerbes différentes, les points H sont presque toujours très différents. Nous avons donc étudié la géométrie de la figure formée par l'origine O, les points H de tous les segments, et les différents points de fuite P_i . Il est intéressant de noter que pour une gerbe perspective donnée correspondant à un point P_i , les points H de tous les segments de cette gerbe sont théoriquement disposés sur un cercle K de diamètre OP. En effet, les droites OH et HP sont orthogonales par construction, donc tous les triangles OHP sont rectangles de même hypoténuse OP. L'exploitation de cette propriété géométrique a déjà été suggérée par Bräuer & Voss [4].

Nous avons donc étudié la possibilité de regrouper l'ensemble des points H de l'image (autant que de segments), directement sous forme de cercles. En effet, il est possible d'envisager ensuite une extraction automatique de tous les cercles formés par ces points H. Une caractéristique des cercles K est d'être définis par seulement deux paramètres, puisqu'ils passent par l'origine des coordonnées. (cf. Figure 4)

■ Recherche automatique des cercles K

Le problème est maintenant de définir tous les cercles qui passent par des ensembles significatifs de points H. Un cercle est défini par 3 points, et il existe évidemment différentes façons de faire passer un cercle par un ensemble de points, soit en minimisant la distance algébrique entre le cercle et les différents points, soit en minimisant la distance géométrique [8]. Dans notre application et pour la simplicité du modèle nous avons choisi de minimiser la distance algébrique :

$$F(x) = a x^t x + b^t x + c = 0, \quad (1)$$

où $a \neq 0$ et $b \in \mathbb{R}^2$.

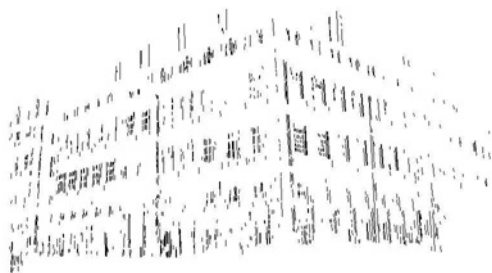


Figure 3 : Classification des segments verticaux par rapport à leurs angles θ .

Pour ajuster un cercle à un nuage de points, il faut calculer a, b et c. En insérant les coordonnées des points dans l'équation (1) nous obtenons un système d'équations tel que :

$$B u = 0, \quad (2)$$

où $u = (a; b_1; b_2; c)$ et

$$B = \begin{bmatrix} X_{11}^2 + X_{12}^2, X_{11}, X_{12}, 1 \\ \dots \\ X_{n1}^2 + X_{n2}^2, X_{n1}, X_{n2}, 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Pour trouver la solution de l'équation homogène (2) nous imposons la contrainte suivante :

$$\|u\| = 1, \quad (4)$$

et nous cherchons donc à minimiser le système suivant :

$$\min_{\|u\|=1} \|B u\|. \quad (5)$$

Ce système sera résolu par une décomposition SVD et la solution finale sera celle de la plus petite valeur propre du vecteur propre correspondant :

$$K = (k_1, k_2) = \left(-\frac{b_1}{2a}, -\frac{b_2}{2a} \right) \quad (6) \quad \blacksquare$$

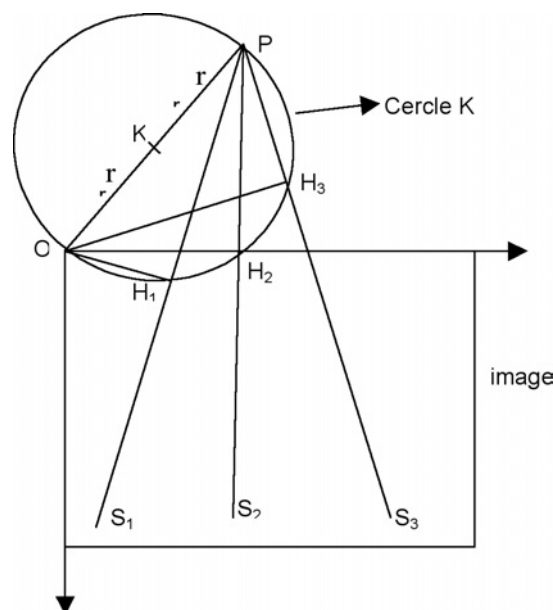


Figure 4 : Configuration des points H, du point de fuite P et du cercle K sur l'image.

$$r = \sqrt{\frac{\|b\|^2}{4a^2} - \frac{c}{a}} \quad (7)$$

où k_1 et k_2 sont les coordonnées du centre du cercle K , et r son rayon. En outre on est dans un cas de figure où le cercle passe par l'origine O , donc $c = 0$.

La méthode des moindres carrés est connue pour avoir une robustesse exécrable dès qu'il existe des mauvais points. Nous avons donc adopté la méthode *RanSac* [7], qui est connue en photogrammétrie et en vision par ordinateur pour sa grande robustesse et sa rapidité de calcul. Il s'agit d'une méthode d'estimation par consensus. On commence par un échantillonnage aléatoire de 3 points qui permet de déterminer un cercle, puis avec les paramètres ainsi calculés, on sélectionne les points dont la distance au cercle est inférieure au seuil prédéfini (t). On cherche à ce stade le meilleur cercle passant par les points ainsi choisis. En analysant visuellement la représentation graphique des points H extraits, nous retrouvons bien les arcs de cercle évoqués précédemment (cf. Figure 5).

Pour ce faire, chaque point qui est retenu pour participer à la détermination d'un cercle est retiré de l'ensemble de segments de départ. Le nombre de points minimal participant au consensus est déterminé comme un pourcentage du nombre total de segments détectés, et ce pourcentage est l'un des paramètres importants de réglage de l'algorithme. Par itérations successives, la totalité des cercles est extraite, et si le réglage des seuils est bien adapté, on obtient uniquement les cercles correspondant aux points de fuite (cf. Figure 6).

■ Estimation de l'incertitude sur le point de fuite calculé

Dans la partie 2 nous avons déterminé la matrice variance-covariance des paramètres d'une droite sachant que l'équation de la droite est paramétrable de la façon suivante :

$$-\sin(\theta) \cdot x + \cos(\theta) \cdot y = \rho \quad (8)$$

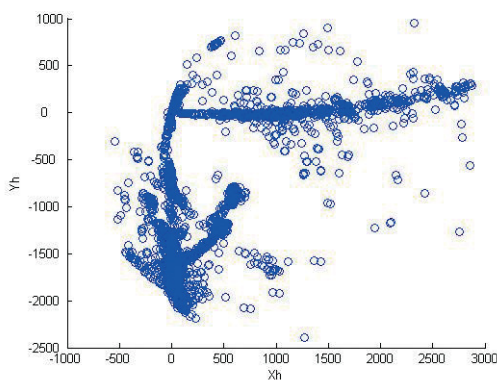


Figure 5 : Exemple des points H . On note que les cercles passent par le point $(0, 0)$ origine de l'image.

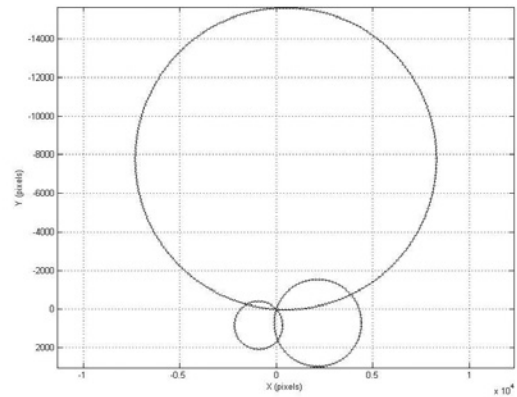


Figure 6 : Cercles extraits à partir des nuages de points H .

Pour chaque segment nous avons calculé les paramètres θ et ρ ainsi que leurs incertitudes, à partir de la matrice variance-covariance :

$$\Sigma_{\theta, \rho} = \begin{bmatrix} \sigma_{\theta}^2 & \sigma_{\theta, \rho} \\ \sigma_{\theta, \rho} & \sigma_{\rho}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Nous cherchons maintenant à propager l'erreur d'estimation des paramètres de la droite sur le pied H de la droite perpendiculaire au segment considéré issue de O . H est défini par :

$$H = \begin{bmatrix} -\rho \cdot \sin(\theta) \\ \rho \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (10)$$

En utilisant la loi générale de la propagation d'erreurs pour les fonctions non linéaires, et en se basant sur le théorème de Taylor :

$$\Sigma_H = J \Sigma_{\theta, \rho} J^T \quad (11)$$

où J est la matrice Jacobienne qui contient les dérivées de H selon ρ et θ :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_x}{\partial \theta} & \frac{\partial H_x}{\partial \rho} \\ \frac{\partial H_y}{\partial \theta} & \frac{\partial H_y}{\partial \rho} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ -\rho \cdot \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

A partir de (11) nous obtenons la matrice variance-covariance sur le point H :

$$\Sigma_H = \begin{bmatrix} -\rho \cdot \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ -\rho \cdot \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_{\theta}^2 & \sigma_{\theta, \rho} \\ \sigma_{\theta, \rho} & \sigma_{\rho}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\rho \cdot \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ -\rho \cdot \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

En d'autres termes nous disposons du poids attribué pour chaque point H de l'image. Nous nous rapprochons donc du but final c'est-à-dire la propagation de l'erreur de ρ et θ sur le point de fuite. Rappelons que P , le point de fuite est calculé à partir des paramètres du cercle :

$$P_x = 2 \cdot K_x \quad (14)$$

$$P_y = 2 \cdot K_y \quad (15)$$

En utilisant des moindres carrés pondérés par rapport à H nous

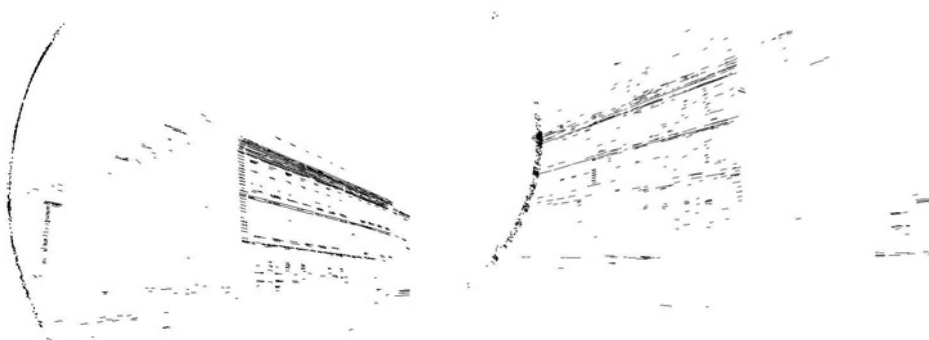


Figure 7 : Les cercles K correspondant aux gerbes perspectives de deux façades d'un bâtiment : on notera les nombreux artefacts correspondant aux parties de l'image situées en dessous de l'horizontale.

pouvons ainsi obtenir l'incertitude sur les paramètres du cercle, et à partir de celle-ci, calculer la matrice variance-covariance du point de fuite, ce qui revient à estimer l'incertitude sur le point de fuite par rapport à la précision du calcul des points H. Dans cette étape un test du χ^2 pourra intervenir pour rejeter les éventuels points H qui ne contribuent pas à ce point de fuite.

■ Implémentation

Notre stratégie pour le calcul de l'incertitude du point de fuite est la suivante : Dans un premier temps et comme cela a été indiqué dans le 3.2, nous ne nous préoccupons que de l'extraction des principaux cercles et du regroupement des segments dans différentes classes. Cette étape accomplie, nous procédons dans chaque groupe de point H aux calculs décrit en 3.3, c'est-à-dire nous introduisons une incertitude sur nos points H. La dernière étape sera donc de calculer la matrice

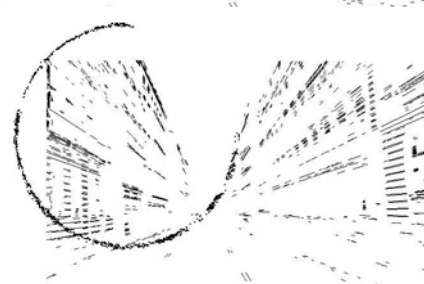
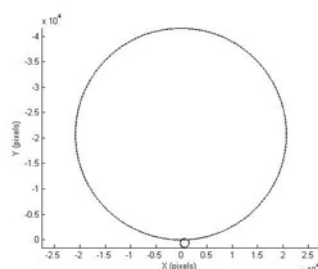
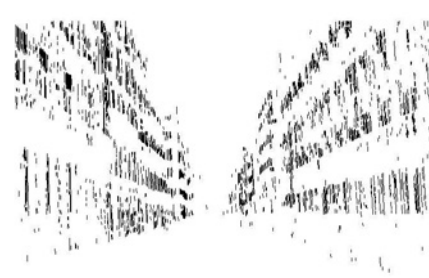
variance-covariance sur le point de fuite correspondant à chaque classe de H.

Validation visuelle de l'algorithme

Une fois que l'on a calculé les paramètres de tous les cercles, pour pouvoir valider l'algorithme, nous traitons le problème en sens inverse, c'est-à-dire que partant de l'ensemble de tous les segments nous sélectionnons et représentons sur l'image d'origine les segments correspondant aux cercles calculés. On peut ainsi optimiser le réglage des paramètres du RanSac, et identifier où prennent naissance des artefacts résiduels. Nous avons ainsi identifié sans surprise que dans les paysages urbains courants, avec des images acquises à hauteur d'homme, la partie basse de l'image (en dessous de 1,50 m par exemple) était très riche en segments sans aucun rapport avec les bâtiments (peintures au sol, mobiliers urbains, véhicules en stationnement...).

Annexe

Résultats



Exemple de détection de points de fuite dans une image de rue. De gauche à droite : Image brute, segments extraits, segments verticaux seuls, cercles K extraits (le grand correspond aux verticales, avec un point de fuite très loin de l'image), validation visuelle montrant les segments liés à des horizontales et le cercle K correspondant, image d'origine avec superposition les lignes de fuite extraites.

■ ■ ■ Perspectives et conclusions

Nous avons présenté une nouvelle méthode de détection automatique de points de fuite en se basant sur une géométrie simple dans l'espace 2D de l'image. Les résultats montrent l'efficacité de cette méthode de calcul, qui en outre est rapide, ce qui permet d'envisager son utilisation en temps réel sur le terrain. Il reste néanmoins quelques points à approfondir dans notre algorithme, comme par exemple le paramétrage automatique de la méthode Ransac selon les différentes variantes d'images. Dans nos travaux futurs nous chercherons à exploiter les points de fuite dans les calculs de compensation par faisceaux, afin en particulier de déterminer les paramètres internes de la caméra (focale et centre de perspective). ●

Remerciements

Nous remercions ici les trois collectivités territoriales : Le Mans Métropole, le Conseil Général de la Sarthe, et Conseil Régional des Pays de la Loire, pour leur soutien à cette recherche. Nous remercions également le laboratoire Matis de IGN pour la fourniture des différents outils de programmation.

Références

- [1] A. Almansa, A. Desolneux, S. Vamech, *Vanishing points detection without any a priori information*. IEEE Trans. on PAMI, 25(4):502-507, 2003.
- [2] Barnard S. *Interpreting perspective images*. Artificial Intelligence, vol. 21. 1983.
- [3] B. Brillault, B. O'Mahoney, *New method for vanishing point detection*. CVG-IP, Image Understanding, 54(2) : 289-300, 1991.
- [4] C. Bräuer, Burchardt, Klauss Voss, *Robust Vanishing Point Determination in Noisy Images*. Internal report, Digital Image Processing Group. Institute for Compute Science. University of Jena. Germany. 1999.
- [5] R. Deriche, R. Vaillant, O. Faugeras. *From Noisy Edges Points to 3D Reconstruction of a Scene : A Robust Approach and Its Uncertainty Analysis*. World Scientific Series in Machine Perception and Artificial Intelligence , Vol. 2, p. 71-79. 1992.
- [6] R. Deriche, *Using Canny's criteria to derive an optimal edge detector recursively implemented*, Int. J. Computer Vision, Vol. 2, p. 15-20, Avril 1987.
- [7] M. A Fischler, R. C. Bolles, *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. Communications of the ACM, Vol. 24(6):, p.381-395. 1981.
- [8] W. Gander, G. H. Golub, and R. Strebel, *Fitting of circles and ellipses least squares solution*, Technical Report 217, Institut fur Wissenschaftliches Rechnen, ETH Zurich, June 1994.
- [9] F.A Heuvel, *Vanishing point detection for architectural photogrammetry*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXII part 5, p. 652-659. 1998.

- [10] E. Lutton, H. Maitre, J. Lopez-Krahe, *Contribution to the determination of vanishing points using Hough transform*. IEEE Trans. PAMI. Vol. 16, N°4, p.430-438, Avril 1994.
- [11] M. J. Magee, J. K. Aggarwal, *Determining vanishing points from perspective images*. CVGIP, 26(2): p.256-267. 1984.
- [12] N. Paparoditis *Thèse Reconstruction 3D de paysages urbains en imagerie stéréoscopique satellitale haute résolution*, Thèse, Université de Nice-Sophia Antipolis, 1998.
- [13] L. Quan, R. Mohr, *Determining perspective structures using hierarchical Hough transform*. Pattern Recognition Letters Vol. 9, pp. 279-286. 1989.
- [14] T. Tuytelaars, L. Van Gool, M. Proesmans, T. Moons, *The cascaded Hough transform as an aid in aerial image interpretation*. Proceedings of ICCV, p.67-72, 1998.

Contacts

Mahzad KALANTARI

Doctorante à l'ESGT le Mans
associée à l'équipe Image Vidéo Communications
Institut Recherche Communications Cybernétique de Nantes (IRCCyN)
mahzad.kalantari@esgt.cnam.fr

Franck JUNG

Directeur de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT)
franck.jung@esgt.cnam.fr

ABSTRACT

In architectural photogrammetry as well as in the programs of 3D urban surveys that currently take more and more importance, we search for the solutions allowing to facilitate the fieldwork and the aerotriangulation in the most automatic possible way. In this kind of works it is clear that one can take benefit from the perspectives formed by the parallel lines of the imaged object and of the resulting vanishing points. But for an efficient operation these vanishing points must be recovered without human intervention, problem that up to here has not been solved in a fully satisfactory way. Following our works, we present here a new completely automatic method of detection of vanishing points, robust and of reduced complexity compared to the classic algorithms, in two steps : a detection of segments by a modified algorithm of Canny-Deriche, followed by a characterization of each of the segments by their belonging to a specific circle of the original space. The good performance in terms of robustness is also followed of a complexity reduction since the whole process is achieved in 2D without any external help.

Hypothèses cosmogéniques du Moyen Age occidental et de la Renaissance

■ Raymond D'HOLLANDER

Les auteurs et les clercs du Moyen Age imaginaient le Cosmos :

- d'une part selon la Bible et plus particulièrement la Genèse
- d'autre part selon les acquis de la culture antique, dans laquelle l'œuvre d'Aristote occupait une large place.

Le Cosmos selon Cosmas

Vers 530 environ *Cosmas*, moine égyptien, imagine la terre selon un rectangle d'une longueur égale à 400 journées de navigation et de largeur égale à 200 journées de navigation, entourée par l'océan, au-delà duquel se trouve l'Eden. Au centre du rectangle est située Jérusalem. Autour d'une grande montagne tournent le soleil et la lune.

Carte T et O

Après Cosmas apparaissent des cartes symboliques, en général circulaires, sur lesquelles figurent les trois parties du monde habité : Europe, Afrique, Asie, entourées d'un océan circulaire : c'est ce qu'on appelle l'*orbis tripartitus*.

La surface intérieure d'un cercle est divisée en trois parties par la lettre T, d'où le nom de cartes ou "*mappemondes T et O*".

Le montant vertical du T représente la Méditerranée, qui sépare l'Europe et l'Afrique. Les deux moitiés de la traverse horizontale du T sont respectivement à gauche le *Tanaïs* (le Don), à droite le Nil. Au Nord de la traverse s'étend l'Asie (voir Figure 1). Au centre, au point de jonction entre le montant et la traverse du T se trouve Jérusalem.

Dans le cadre on trouve, côte à côte, des détails géographiques (bâtiments), des dessins mythiques et des écritures diverses : (voir Figure 2).

Les sphères de la terre, de l'eau, de l'air et du feu

Au début du XIII^e siècle paraît le *Traité de la sphère* de Sacrobosco, qui connut un énorme succès au Moyen Age : 25 éditions avant 1500 et même à la Renaissance : 40 éditions

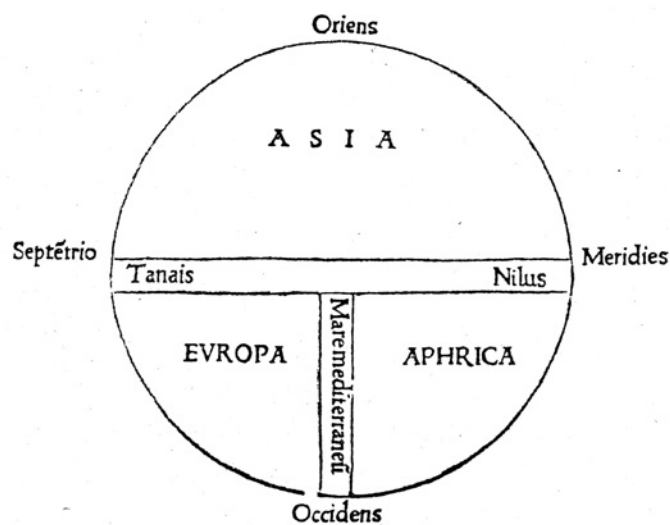


Figure 1 : Mappemonde "T et O" d'après Zacharia Lilio, *Orbis Brevarium*, Florence, 1493.



Figure 2 : Carte de Salluste.

■ ■ ■ jusqu'en 1647. Ce traité servait de manuel de sciences physiques dans la plupart des universités médiévales. Se référant à Aristote, Jean de Sacrobosco donnait au cosmos la forme de quatre sphères concentriques constituées par les quatre éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu. Voici comment il s'exprime dans son traité :

"La machine universelle du Monde se divise en deux régions, la région de l'éther et la région des éléments.

La région des éléments, qui est sujette à une altération continue, se divise à son tour en quatre parties. La terre est comme le centre du Monde ; elle est située au milieu de toutes choses. Autour de la terre est l'eau ; autour de l'eau est l'air ; autour de l'air est ce feu pur et exempt de trouble qui, comme le dit Aristote au livre des Météores, atteint l'orbe de la lune [...]

Chacun des trois derniers éléments entoure la terre sous forme d'une couche sphérique (orbiculariter), sauf là où la sécheresse de la terre met obstacle à l'humidité de l'eau, afin de conserver la vie des être animés."

Alors que Sacrobosco donne une explication naturelle de la terre ferme, laissée à découvert par les eaux, la plupart des auteurs du Moyen Âge invoquent l'intervention de Dieu, qui d'après le récit de la création dans la Genèse, ordonne le rassemblement des eaux en un même lieu. La pensée médiévale admettait une proportion de un à dix entre le volume d'un élément et de celui qui le suivait, donc 10 fois plus d'eau que de terre, 10 fois plus d'air que d'eau, etc.

La question des antipodes

Vers 1500 avant J.-C., *Crates de Mallos*⁽¹⁾ avait imaginé un globe terrestre, où à l'opposé de l'œcumène (partie du monde habitée connue des grecs dans l'hémisphère boréal) se trouvait dans l'hémisphère austral, un continent : les *Antipodes*. Il y avait de même un autre continent dans l'hémisphère boréal : les *Perioeci*, auquel était opposé dans l'hémisphère austral les *Antoeci*. Cela constituait au total 4 "îles" (voir Figure 3).

Le problème se posait au III^e siècle de notre ère de savoir si ce continent, les Antipodes, était ou non habité. L'un des pères de l'Eglise, *Lactance* (env. : 250 - env. 325) s'exprimait comme suit à ce sujet :

"Ceux qui tiennent qu'il y a des antipodes, tiennent-ils un sentiment raisonnable ? Y a-t-il quelqu'un d'assez extravagant pour se persuader qu'il y a des hommes qui aient les pieds en haut et la tête en bas ; que tout ce qui est couché en ce pays-ci soit suspendu en celui-là ; que les herbes et les arbres y croissent en descendant, et que la pluie et la grêle y tombent en montant ? [...] Comment donc se sont-ils engagés à soutenir qu'il y a des antipodes ? En observant le mouvement et le cours des astres, ils ont remarqué que le soleil et la lune se couchent toujours de même. Mais ne pouvant découvrir l'ordre de leur marche ni deviner comment ils pas-



Figure 3 : Le globe de Cratès.

saient de l'Occident à l'Orient, ils se sont imaginé que le ciel était rond, tel que sa vaste étendue le fait paraître ; que le monde même était rond comme une boule, que le ciel tournait continuellement, et qu'en tournant il ramenait le soleil et les astres de l'Occident à l'Orient. [...] Le ciel étant rond, il fallait que la terre, qui est renfermée dans son étendue, fût aussi ronde. Que si elle est ronde, elle regarde le ciel de tous côtés de la même manière et lui oppose de tous côtés des mers, des plaines et des montagnes. Il suit encore de là qu'il n'y a aucune partie qui ne soit habitée. Voilà comment la rondeur que l'on a attribuée au ciel a donné occasion d'inventer les antipodes. Quand l'on demande à ceux qui défendent ces opinions monstrueuses, comment il se peut faire que ce qui est sur la terre ne tombe pas dans le ciel, ils répondent que c'est parce que les corps pesants tendent toujours vers le milieu comme les rayons d'une roue et que les corps légers comme les nuées, la fumée, le feu, s'élèvent en l'air. J'avoue que je ne sais ce que je dois dire de ces personnes qui demeurent opiniâtres dans leurs erreurs et qui soutiennent leurs extravagances, si ce n'est que quand ils se disputent, ils n'ont point d'autre dessein que de se divertir ou de faire paraître leur esprit. Il me serait aisé de prouver, par des arguments invincibles qu'il est impossible que le ciel soit au-dessous de la terre. Mais je suis obligé de finir ce livre-ci..."

On ne saurait imaginer un esprit plus obtus que celui de Lactance et pourtant dans son *De revolutionibus orbium cœlestium* de 1543 Copernic se croit encore obligé de réfuter le raisonnement puéril de Lactance.

Hypothèse de Paul de Burgos

Paul de Burgos (vers 1350-1435) s'efforce de rendre le livre de la Genèse plus proche de la théorie aristotélicienne. Au lieu du

(1) voir R. D'Hollander "Sciences géographiques dans l'Antiquité" page 144.

Dieu "rassembleur" des eaux de la Genèse, il imagine un Dieu "translateur" de ces eaux. Avant le rassemblement des eaux, ordonné par Dieu le 3^e jour de la Genèse, les éléments d'Aristote formaient des sphères concentriques. Par intervention divine le centre de la sphère de l'eau s'est traduit par rapport au centre de la sphère de la terre.

Le commentaire de la figure 4 par Nicolas de Lyre (1481) est le suivant :

"Dans cette figure, soit a le centre de la terre, qui est également le centre de l'univers et soit b d g e la sphère de la terre autour du centre a et soit m n o la sphère des eaux avant leur rassemblement autour du centre a susdit qui est le centre de l'univers.

Car l'eau selon la nature primordiale, entourera de façon égale, étant donné que chaque partie d'eau tendait de façon égale vers le centre de la terre, qui est le centre de l'univers. Or Dieu a ordonné que cette sphère de l'eau se rassemblât en un seul lieu de telle sorte que la terre ferme apparut. Que donc la seconde sphère de l'eau c d e, sphère qui d'ailleurs est égale à la première sphère de l'eau, c'est-à-dire la sphère m n o. Que le centre de la sphère de l'eau après son rassemblement soit f qui est excentré comme il a été dit, parce qu'il est distant et écarté du centre o qui est le centre du monde".

La partie émergée est donc l'arc *ed* de la sphère de l'eau, après sa translation ; c'est une zone restreinte, car d'après Paul de Burgos "les philosophes disent que l'élément de l'eau est dix fois plus volumineux que la terre".

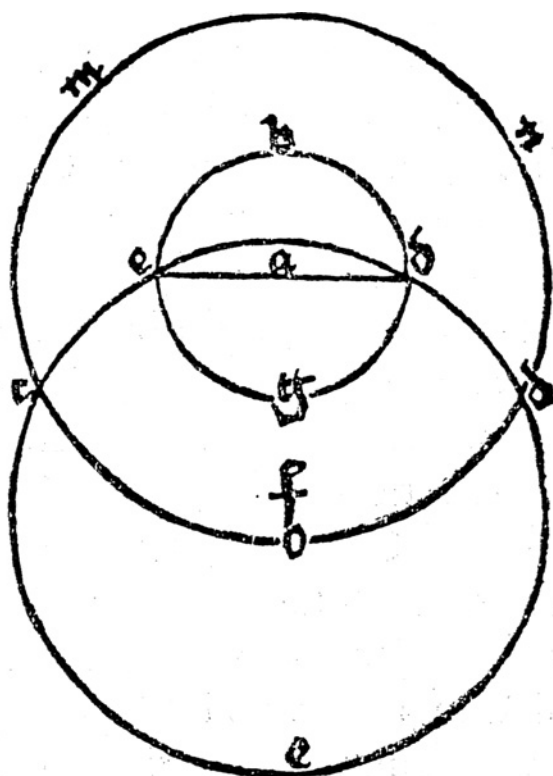


Figure 4 : Les sphères de l'eau et de la terre avant et après le 3^e jour de la création d'après Paul de Burgos.

Hypothèse de Gregor Reisch

En 1503 paraît à Fribourg en Brisgau la première édition de la *Margarita Philosophica* de Gregor Reisch qui eut un vif succès avec douze éditions avant 1550.

Reisch s'inspire de la théorie de Jean Buridan (env. 1300-env. 1358). La terre étant de densité non uniforme, son centre de gravité A ne coïncide pas avec son centre de grandeur B (figure 5), mais le centre de gravité C de l'ensemble de la terre et de l'eau coïncide avec le centre du monde, qui est le centre de grandeur de la sphère de l'eau. Voici comment s'exprime Reisch dans le chapitre "De la disposition de l'eau" de la *Margarita Philosophica* :

"Au début de la création des choses, l'eau entourait toute la surface de la terre à la façon d'une nuée très légère, et elle atteignait les régions les plus hautes. Mais sur l'ordre du Créateur, le firmament sépara les eaux des eaux, et celles qui restèrent en dessous du firmament se sont rassemblées en un seul lieu, à savoir les concavités de la terre, afin que les êtres animés puissent habiter à sa surface. Et ainsi la totalité de la substance de la terre et de l'eau a constitué un unique corps sphérique, auquel les philosophes assignaient un double centre, l'un de gravité, l'autre de grandeur. Le centre de grandeur, en effet, divise en deux parties égales l'axe de toute la sphère constituée par l'eau et la terre, et c'est le centre du monde. Mais le centre de gravité est placé en dehors de celui-ci, à savoir (qu') il se trouve sur le diamètre de la terre, qui est nécessairement plus grand que le rayon de la sphère composée de l'eau et de la terre parce que, s'il n'en était pas ainsi, nulle qualité qui lui est propre ne retiendrait la terre au centre du monde, et sans la science naturelle et l'astronomie, on pourrait difficilement dire quelque chose de plus absurde que cela.

La nécessité d'admettre une diversité de centres découle de ce que la terre qui n'est pas recouverte par les eaux est plus légère que la partie de la terre qui est entourée par les eaux. ■■■

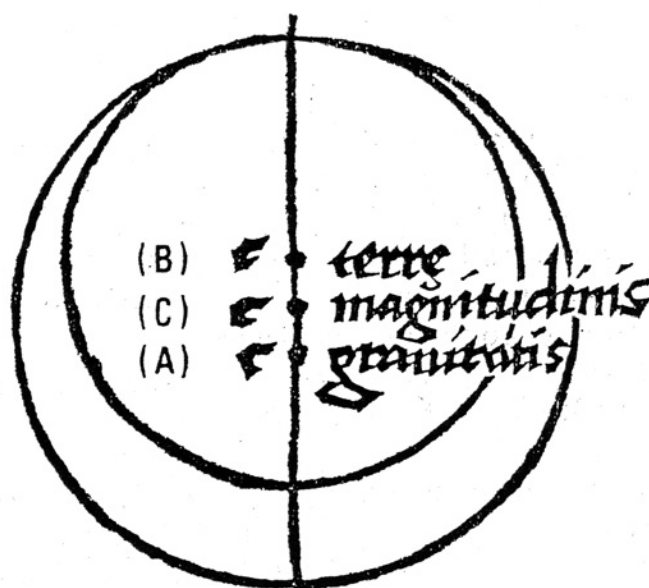


Figure 5 : Les sphères de l'eau et de la terre d'après Gregor Reisch dans *Margarita Philosophica*.

■ ■ ■ Et la terre émergée, si elle est humidifiée, se sèche à nouveau et devient plus légère. C'est pourquoi son centre de gravité ne peut pas être le même que son centre de grandeur. Mais, placé sur le diamètre de la terre, il tend davantage vers la circonférence et la partie couverte par les eaux. Car les eaux sont rassemblées davantage vers cette partie en tant que celle-ci est plus près du centre du monde. De cela, on peut conclure que la terre est en mouvement local continu, par lequel les parties plus éloignées de son centre de gravité s'efforcent de devenir égales aux autres. La surface de tout l'ensemble est une surface convexe, et l'eau n'envahit pas la surface de la terre, mais elle baigne et l'entoure presque en son milieu dans un creux, comme l'atteste la Sainte Ecriture : l'Océan l'a recouverte comme un manteau, mais en sens contraire : tu as imposé aux eaux une limite qu'elles ne franchiront pas et elles ne reviendront plus recouvrir la terre."

L'inexistence de deux sphères distinctes de la terre et de l'eau

En 1520 paraît à Salamanque le *Physicus Compendium* de Pedro Marghalho, cosmographe portugais ayant fréquenté la Sorbonne. Il est le premier à se servir de l'expérience des navigateurs pour démontrer qu'on ne saurait admettre qu'il existe deux sphères distinctes pour la terre et l'eau de grandeurs différentes, car s'il en était ainsi la longueur des degrés en milles

serait plus grande sur la sphère de l'eau que sur la sphère de la terre : or une telle constatation n'a été faite par aucun marin.

Dans une note en marge de son édition en portugais de la sphère de Sacrobosco⁽²⁾ (1537) le célèbre cosmographe Pedro Nunes (1502-1578) s'exprime de façon analogue en ajoutant un argument astronomique.

"Ces deux éléments, l'eau et la terre, constituent ensemble une sphère, comme le prouvent les éclipses de lune. On peut également prouver qu'il en est ainsi parce qu'à un degré du ciel correspond un même nombre de lieues ou de milles sur terre et en mer : ce ne pourrait pas être le cas si tous deux ne formaient pas une seule sphère."

Dans le commentaire de la sphère de Sacrobosco, édition de 1581, Christophe Clavius s'exprime dans le même sens. Dans une édition postérieure du même commentaire, de 1593, on trouve une figure curieuse (Figure 6). On se perd en conjectures sur le sens de cette figure, qui se trouve dans un ouvrage qui refuse l'hypothèse de deux sphères distinctes pour la terre et l'eau. Probablement le graveur veut montrer l'incompatibilité entre l'hypothèse de deux sphères distinctes pour la terre et l'eau et l'hypothèse des antipodes.

Le concept de globe terraqué

Ainsi après plusieurs siècles d'obscurantisme marqués par le recours :

- aux quatre éléments d'Aristote : terre, eau, air, feu
- à la distinction entre une sphère de la terre et une sphère de l'eau
- au récit de la Genèse, la logique finit par triompher. Il n'y a qu'une sphère ou un seul globe où se côtoient : la terre (terra) dans les parties émergées et l'eau (aqua) dans les parties déformées d'un même globe.

On a formé un nouveau mot : *terra-aqua*, dont on a tiré au XVI^e siècle le concept de globe terraqué. La définition qu'en donne Jean Fernel dans sa *Cosmotheoria* dédiée au roi du Portugal D. Joao III est la suivante.

"...la surface de la terre habitée forme, avec l'eau qui la baigne, une surface unique, elle-même convexe, dont le centre est le même que celui de l'univers. Car il est évident, aussi bien par les écrits des hommes érudits que par le témoignage fidèle des navigateurs, que la mer elle-même est çà et là parsemée d'innombrables îles et de très nombreux bancs de sable, qui conservent presque la même forme convexe que la mer, et tout le monde est d'accord que ces endroits ne sont pas moins éloignés du centre de l'univers que de la surface de la terre habitée."

Il est remarquable que ce concept ait déjà été exposé par Ptolémée vers 150 dans sa *Géographie*⁽³⁾. ●

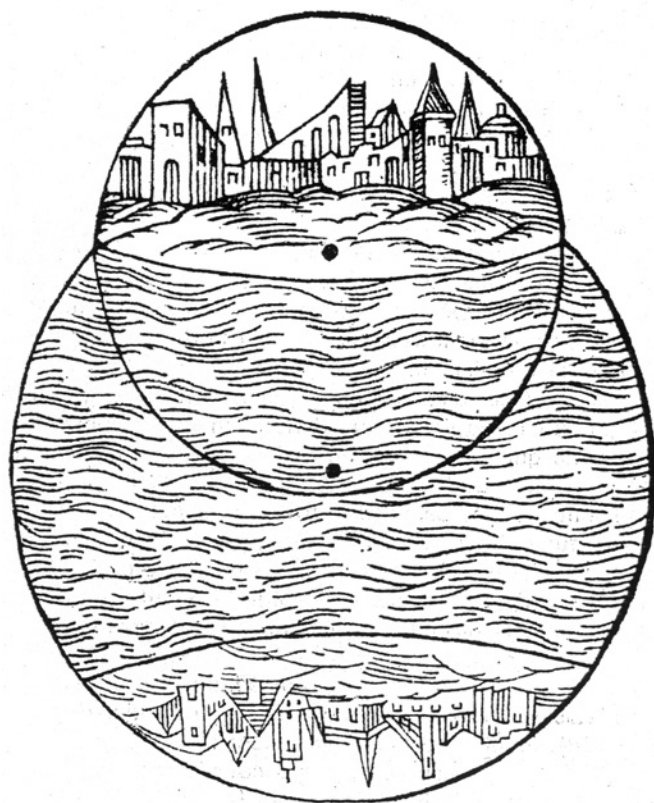


Figure 6 : Dans Christophe Clavius, *In Sphaeram de Sacrobosco commentarius*, Lyon 1593.

(2) voir R. D'Hollander "Loxodromie et projection de Mercator" page 19.

(3) voir R. D'Hollander "Sciences géographiques dans l'antiquité" page 380.

La pratique de l'arpentage au XIX^e siècle

■ Ambroise GARLOPEAU

Soucieux d'offrir toutes les garanties aux opérations d'arpentage, le pouvoir royal s'efforça dès le XIII^e siècle, de réglementer la profession d'arpenteur. En 1789, les révolutionnaires détruisirent l'organisation patiemment mise en place au fil des siècles, sans la remplacer par aucune règle. Désormais, la profession d'arpenteur est libre. Quiconque connaît les rudiments de l'arpentage peut se prétendre géomètre et faire des bornages en justice. Dans ce contexte, les géomètres subissent un double assaut : l'un de la part des arpenteurs occasionnels qui les remplacent souvent à moindre coût ; l'autre par l'intrusion d'individus peu recommandables s'arrogeant le titre de géomètre. Au cours du XIX^e siècle, les géomètres ont mené un combat sans merci pour la reconnaissance de leur profession.

Jusqu'à la Révolution, il fallait détenir un office du roi pour exercer la profession d'arpenteur. Il en existait plusieurs sortes. À côté des offices d'arpenteur des maîtrises des Eaux et Forêts créés par l'édit d'Henri II de 1554, on trouve les offices d'arpenteurs-jurés et de notaires-arpenteurs, créés par l'édit du mois de mai 1702. Nul n'avait le droit d'arpenter et de borner des terres s'il n'avait obtenu l'autorisation du roi. Cette réglementation stricte avait pour but d'empêcher l'exercice de la profession d'arpenteur par des individus incompetents ou malhonnêtes.

La Révolution de 1789 eut pour effet de faire éclater cette réglementation sur les arpenteurs établie au fil des siècles par les rois de France. Désormais, quiconque connaissait les rudiments de l'arpentage pouvait s'intituler géomètre et exercer librement cette profession. Celle-ci se révèle par ailleurs des plus utiles, dans la mesure où les lois successorales prévues par le Code civil entraînèrent un morcellement très important des propriétés. À tel point que Léon Faucher a pu déclarer en 1836 : *"la propriété tombe en poussière."* Ce morcellement, mis en scène par Emile Zola dans *La terre*, rendit nécessaire pour les populations rurales la connaissance de l'arpentage. En proclamant la propriété individuelle et libre, les lois révolutionnaires puis le Code civil ont multiplié les transactions immobilières. À l'occasion des ventes, des échanges, des par-

tages successoraux et même pour se prémunir contre les envahissements du voisin, il était très utile pour le propriétaire de connaître l'art de mesurer la terre. Ce phénomène s'accompagne d'un engouement des populations rurales du XIX^e siècle pour l'arpentage. Cet art se révèle éminemment utile pour qui veut administrer ses biens avec profit.

Dans ce contexte, les géomètres se sont souvent heurtés aux gens de la campagne dans l'exercice de leur art. Tout au long du XIX^e siècle et jusqu'à la création de l'ordre des géomètres en 1946, ils ont tant bien que mal essayé de réglementer l'exercice de leur profession pour lui rendre son prestige passé.

L'arpentage mis à la portée de tous

L'expansion de la connaissance des techniques de l'arpentage se manifeste par l'enseignement dans les écoles de l'arpentage dès les années 1830 et par la multiplication des ouvrages de vulgarisation des méthodes d'arpentage.

■ L'apprentissage dans les écoles

Dès le début du XIX^e siècle, les hommes politiques ont été conscients de l'utilité pour les populations de la campagne de cet apprentissage. La classe des propriétaires grandit chaque jour et les pièces de terres ont tendance à devenir de plus en plus étroites. *"Le morcellement a pris d'incroyables proportions"*, lance Johanet lors du Congrès national des syndicats agricoles tenus à Orléans en 1897. Or le morcellement multiplie le voisinage, ce qui est une cause incessante de difficultés et de procès. Vasserot, avocat près la Cour d'appel de Paris, rappelle le lien inextricable entre le morcellement excessif du sol et la nécessité de recourir aux opérations d'arpentage et de bornage : *"moins grande est la propriété, plus le propriétaire veut la conserver entière et plus il tient à une délimitation exacte : de là nécessité d'arpentages fréquents et régulièrement faits ; ce sont les seuls moyens de conserver à chacun le sien et d'éviter les discussions judiciaires."*

Fort de ces vérités, le législateur a introduit l'arpentage dans le programme scolaire. Plusieurs lois le prévoient parmi les matières enseignées dans les écoles primaires, notamment la loi Guizot du 28 juin 1833 et la loi Falloux du 15 mars 1850. De plus, pour rendre effectives ces dispositions, diverses mesures introduisent l'arpentage parmi les matières étudiées dans les Ecoles Normales d'instituteurs et dans l'examen du brevet de capacité pour les instituteurs et les institutrices primaires. De sorte que l'inspecteur spécial de l'instruction primaire du département de la Seine écrit en 1839 : *"dans toutes*

- ■ ■ les écoles normales, les élèves-maîtres étudient la théorie et la pratique de l'arpentage." Par le biais de l'école, l'art de mesurer les terres se diffuse progressivement dans toutes les couches de la population. Un avoué de Bar-le-Duc témoigne de cette progression : *"on enseigne l'arpentage dans toutes les écoles de France ; il n'est guère d'enfants au village qui, après avoir fréquenté l'école pendant quelques années, ne soit à même de mesurer exactement le champ que son père achète, et que lui-même acquerra plus tard."*

Freyssinaud, juge de paix à Limoges dans la seconde moitié du XIX^e siècle, considère que le meilleur moyen de parvenir à un cadastre digne de ce nom est de faciliter le bornage des propriétés : *"en faisant du bornage, nous préparons le cadastre."* Aussi il consacre le plus clair de sa vie et toute son énergie à la délimitation des propriétés privées. L'un des moyens d'y parvenir devait être d'encourager l'enseignement de l'arpentage dans les écoles primaires. Dans ce but, il institua pour les élèves des écoles primaires du canton nord de Limoges des prix qui devaient récompenser ceux qui auront le mieux fait un arpentage appliqué au cadastre et un nivellement appliqué aux irrigations. *"La pratique des nivellements et des arpentages est appelée à un grand avenir, déclare-t-il le 8 octobre 1868 lors de la distribution des prix, c'est par les élèves et les instituteurs des écoles primaires qu'elle doit être mise en mouvement pour donner au gouvernement et à la propriété tout entière les plus grands résultats."*

Le *Journal de l'instruction primaire* de l'Académie de Poitiers apprend comment l'instituteur doit opérer pour transmettre à ses élèves cette connaissance. L'enseignement se décompose en trois parties. Tout d'abord, l'instituteur doit montrer à ses élèves les instruments de mesure (la planchette et l'alidade). Ensuite il les conduit sur le terrain où il exécute devant eux les diverses opérations. Enfin, il leur demande d'appliquer les instruments sur le terrain et d'exécuter les opérations par eux-mêmes. Ces exercices sont l'occasion de sorties pédagogiques à travers les champs et les bois. Jean-François Chanet remarque dans son étude consacrée à l'école républicaine *"les fort nombreuses sorties consacrées à l'arpentage"*.



L'instituteur, secondé par le curé, apprend l'arpentage à ses élèves.

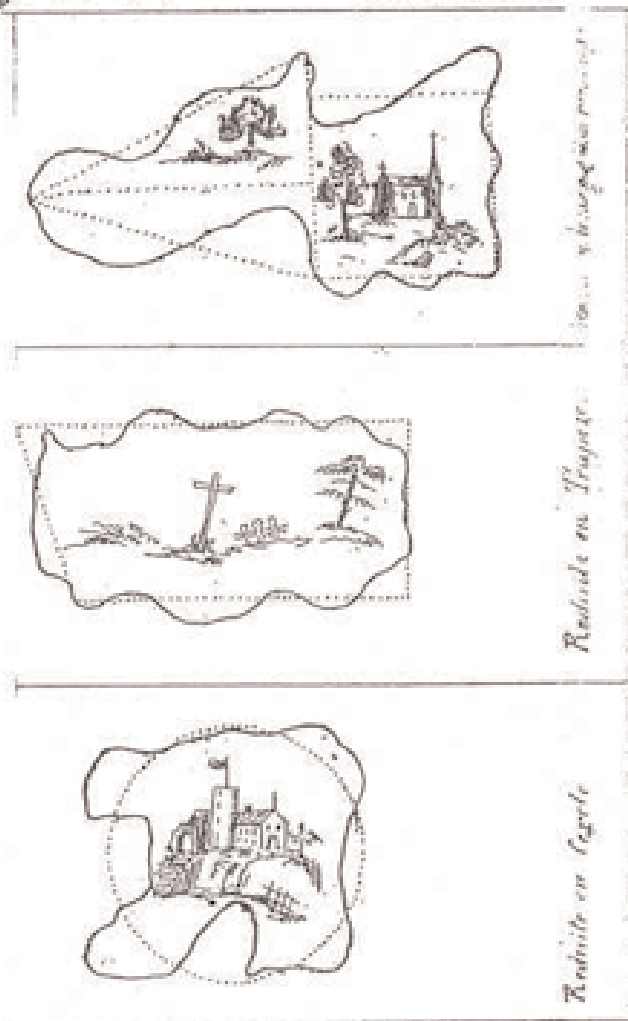
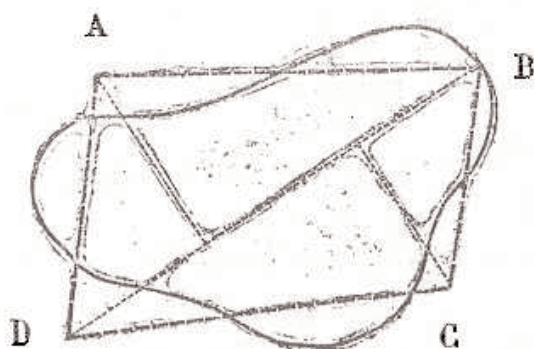
■ L'apprentissage dans les livres

Une autre manifestation de l'expansion de la connaissance de l'arpentage est la multiplication dans une proportion étonnante des ouvrages consacrés à la technique de l'arpentage. Au XVIII^e siècle, les études traitant de l'arpentage sont destinées à un public averti, ayant déjà une certaine expérience de la géométrie pratique. Les auteurs du XVIII^e siècle déplorent souvent le manque de connaissance de la population des campagnes de cet art, pourtant si utile, et l'insuffisance des ouvrages permettant au grand public d'accéder à cette science.

Le XIX^e siècle, au contraire, se distingue par un grand nombre d'ouvrages destinés aux néophytes. Les introductions, avant-propos et autres préfaces sont très instructifs sur l'état de la question en France et sur la détermination des auteurs à faire connaître aux propriétaires cette science des plus utiles. Baudson confie l'objet de son ouvrage : *"C'est pour mettre à la portée de tous, des cultivateurs, surtout, qui sont les plus intéressés, la possibilité d'arpenter une propriété, de la délimiter, de la diviser ou partager, de la borner soi-même sans avoir recours à des tiers, que nous publions cet ouvrage."* La préface du *Traité d'arpentage* de Leyssenne, Inspecteur général de l'enseignement primaire, aboutit aux mêmes fins : *"Nous avons voulu combler cette lacune dans l'instruction du paysan. Mais notre ambition ne va pas jusqu'à vouloir faire d'eux des géomètres ; notre désir est qu'ils puissent, avec notre méthode, qui est aussi simple et élémentaire que possible, se tirer d'affaire eux-mêmes, dans une quantité de cas, avec une chaîne d'arpenteur pour tout instrument."* Couté commence son opuscule par ces mots : *"C'est principalement aux propriétaires, cultivateurs, locataires que nous adressons ce petit livre. L'arpentage est facile à apprendre. Ce n'est pas un art qui exige des études particulières, par conséquent il peut être pratiqué par tout le monde."*

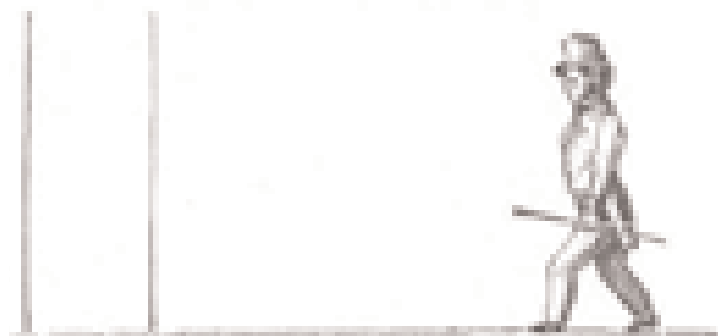
Ces exemples pourraient sans doute être multipliés à l'infini. Dans son *Cours complet d'arpentage*, Puille, professeur de mathématiques, déclare : *"Puisse cet ouvrage contribuer à propager partout une science d'une nécessité chaque jour mieux comprise, à une époque où l'agriculture est encouragée comme un art qui contribue essentiellement au bien-être général des populations."* Ces auteurs répondent ainsi à une demande toujours plus pressante de la population rurale. Thiollet, professeur aux écoles royales d'artillerie, nous apprend ainsi qu'*"il n'est pas rare de rencontrer des propriétaires ruraux, des cultivateurs qui, n'ayant point étudié les mathématiques, désirent acquérir des connaissances sinon dans la théorie, du moins dans la pratique dans les opérations manuelles de l'arpentage."*

Pour mettre l'arpentage à la portée de tous, les règles sont largement simplifiées, les principes édulcorés. *"J'ai cherché à substituer, écrit Thiollet, aux démonstrations didactiques, les seules qui satisfassent le savant, des images parlantes qui puissent être comprises de tout le monde."* Parfois les auteurs sacrifient la précision au profit de la simplicité. Vassal de Montviel recommande à l'arpenteur peu expérimenté de ramener les figures très irrégulières à des figures simples

VASSAL DE MONTVIEL, *Le petit géomètre*, 1847, p. 23.BEDE, *Traité facile d'arpentage*, 1850, p. 20.

dont la superficie peut être facilement calculée : un carré, un triangle, un trapèze, un cercle. Selon l'auteur, le résultat est approximatif mais assez rigoureux pour être adopté dans les divers besoins usuels de la vie.

La floraison d'un grand nombre d'ouvrages consacrés à l'arpentage pratique prouve l'émulation qui existait pour cette



La mesure au pas esquissée par Lamotte.

science dans les campagnes françaises et l'intérêt du propriétaire de connaître l'étendue de ses biens. Ce phénomène est d'autant plus remarquable qu'un grand nombre de ces ouvrages a fait l'objet de nombreuses rééditions. Certains sont devenus des classiques que tout propriétaire se devait de posséder dans sa bibliothèque. Le *Traité d'arpentage* de Lancelot parvient à la vingtième édition en 1840, celui de Lamotte atteint la dixième édition en 1854, le *Cours d'arpentage* de Puille est rendu à la dix-huitième édition en 1887, le livre de Briot connaît douze éditions entre 1853 et 1911. Les ouvrages de Lefèvre, Guilmin et Taviel de Mastaing connaissent eux aussi un certain succès. Les auteurs les plus lus se plaignent parfois du plagiat qui est fait de leurs ouvrages, des articles entiers sont livrés à l'impression plusieurs années après l'apparition du livre qui est reproduit.

L'arpentage des terrains nécessite d'avoir des instruments. Or le défaut d'instruments peut constituer un obstacle pour opérer le mesurage. Souvent onéreux, ils ne peuvent être acquis par les plus pauvres. Les géomètres sont parfois embarrassés eux aussi pour disposer des instruments modernes. Le même problème se pose pour les écoles primaires. Aussi, dans son *Traité élémentaire d'arpentage*, Lamotte, Inspecteur spécial de l'instruction primaire du département de la Seine, constate que : "dans un grand nombre de localités, les instituteurs ne sont pas assez riches pour se procurer une chaîne, une équerre, une planchette, un graphomètre, etc. : nous leur indiquons les moyens de faire opérer les élèves sur le terrain avec des instruments qu'ils construiront eux-mêmes." Aussi les auteurs préconisent-ils des solutions pour parer à cet inconvénient. Teyssèdre explique comment s'y prendre pour fabriquer soi-même ses instruments : la chaîne, les jalons et l'équerre. Couté indique que l'on peut facilement obtenir l'équerre à partir d'un morceau de planche et la chaîne d'arpenteur à partir d'un fil de fer. Gimelli, professeur de mathématiques au collège d'Arles, propose de remplacer les instruments dispendieux du géomètre par des objets peu coûteux : des baguettes de coudrier ou des roseaux peuvent remplacer les jalons ; la chaîne d'arpenteur peut être remplacée par une simple corde. A défaut de tout instrument, Gimelli préconise de mesurer par le pied et par le pas. Dans ce cas, Thiollot recommande de s'exercer auparavant sur des distances connues pour s'assurer de la longueur de son pas et atténuer ainsi l'approximation.

■ La pratique de l'arpentage dans les milieux ruraux

Les justices de paix sont le théâtre de nombreux arpentages. Les propriétaires ne trouvent pas toujours une solution amiable pour délimiter leurs héritages. Dans ce cas, ils recourent au juge de paix qui se charge de borner les propriétés. Au cours de ce genre de procès, il est souvent nécessaire de prendre la mesure des terrains. La question qui se pose est la suivante : qui mesure les propriétés en litige ?

■ Les arpenteurs et la justice

La doctrine est divisée sur le point de savoir si le magistrat peut lui-même faire l'arpentage ou s'il doit toujours nommer un expert. Sous l'Ancien Régime, les jurisconsultes considéraient généralement que le magistrat devait toujours nommer un expert. Les coutumes en décidaient de même, notamment celles du Maine et d'Anjou. De plus, la profession d'arpenteur était réglementée et contrôlée. A la veille de la Révolution de 1789, seuls les titulaires d'offices d'arpenteurs pouvaient réaliser les bornages en justice. Ces arpenteurs avaient le monopole pour faire des arpentages en justice. De plus, certaines coutumes interdisaient aux propriétaires de se borner à l'amiable, notamment dans l'ouest et le nord de la France. *"Bornes se mettent par autorité de justice"* en avait conclu Loisel. Par conséquent, la population rurale était peu familiarisée avec la pratique de l'arpentage. Le propriétaire n'était que le spectateur inutile des opérations.

Au XIX^e siècle, la profession d'arpenteur est libre. Les opérations d'arpentage et de bornage peuvent être librement réalisées par toute personne. Ainsi, les procès en bornage devant les juges de paix mettent en lumière quelles sont les personnes capables d'opérer l'arpentage.



Jehan de MERLIERS, *La pratique de géométrie*, Paris, 1757.

Les juges de paix tout d'abord effectuent souvent eux-mêmes l'arpentage des terrains, à l'aide de leur greffier. La plupart de ces magistrats connaissent et appliquent les règles de l'arpentage, sans l'aide d'un expert. De très nombreuses décisions des juges de paix attestent ce procédé. Le juge de paix de Bruyères écrit en 1860 : *"Je sais un peu de géométrie, cela me permet de faire les bornages simples et faciles sans expert, sans géomètre ; je me crois parfaitement dispensé de recourir à ce dernier, dont la présence et la participation au procès n'aurait qu'un seul résultat, celui d'augmenter inutilement les frais."* Des greffiers de justice de paix réclament parfois des honoraires supplémentaires pour ce travail. Coursières, greffier de paix à Vaour, demande au *Journal des greffiers* : *"dans une action en bornage, le greffier opérant sans le concours d'un géomètre a-t-il droit à des honoraires comme expert, outre ses vacations de greffier ?"*

Mais la doctrine est très partagée sur les capacités des auxiliaires de justice à opérer eux-mêmes l'arpentage et la majeure partie des auteurs préconisent le recours systématique à l'expert, malgré les dépenses supplémentaires pour le justiciable. Jusqu'à la loi du 25 mai 1838 qui confie au juge de paix la compétence en matière de bornage, la doctrine est unanime pour confier l'arpentage à un expert. Lorsque le juge de paix obtient la connaissance des actions en bornage, les auteurs se partagent sur la question de savoir si ce dernier devait nommer un expert pour opérer l'arpentage. Les paroles prononcées par le Garde des Sceaux jettent le trouble au sein de la doctrine : *"le juge de paix évitera aux parties des frais d'expertise, déclarerai-il devant la Chambre des Pairs le 8 mai 1837, il se servira à lui-même d'expert et de géomètre."* Bon nombre d'auteurs s'appuyant sur ces déclarations ont admis que le juge de paix puisse se servir à lui-même de géomètre. De plus, n'étant pas obligé de suivre l'avis de l'expert, comment pourrait-il être obligé d'en nommer un ? Malgré ces arguments, certains auteurs refusent au juge de paix d'opérer lui-même l'arpentage. Soit qu'ils contestent sa compétence en matière d'arpentage et de géodésie, soit qu'ils considèrent qu'il n'est pas *"de la dignité du magistrat de faire l'arpenteur."*

Il en résulte que le juge de paix recourt fréquemment à l'expert, d'abord parce qu'il ne connaît pas les règles de l'arpentage (le recours à l'expert est alors systématique), ce qui est peu fréquent, ensuite lorsque les parties le requièrent, ou encore lorsque l'opération est trop complexe. Le choix de l'expert est libre. Le développement de la maîtrise de l'arpentage dans les campagnes donne au juge de paix une grande liberté pour choisir l'expert, de sorte que les personnes nommées pour opérer l'arpentage proviennent de tous les horizons.

Ce sont dans la plupart des cas des instituteurs qui sont nommés par le juge de paix. Ce choix s'explique par le fait que, enseignant chaque année l'arpentage à leurs élèves, ils en connaissent assez bien les règles. De plus, les instituteurs bénéficient d'une bonne confiance au sein de la population : n'étant généralement pas propriétaires, ils n'ont aucun intérêt à avantager une partie plutôt qu'une autre. Mais les experts peuvent être également des agents-voyers, des

gardes champêtres, des propriétaires, des architectes, des médecins, des notaires publics, des maires ou leur adjoint, des anciens juges de paix. Toute la population participe à l'effort de délimitation des parcelles, car rares sont les habitants des campagnes qui ignorent les rudiments de l'arpentage. Un géomètre lorrain constate en 1859 que *"tout le monde est arpenteur en notre pays et que les instituteurs prennent une large part dans les opérations de bornage."* Les experts choisis par les juges de paix sont parfois des géomètres-arpenteurs. C'est le cas notamment lorsque les parties le requièrent ou lorsque l'opération est d'une grande importance.

Or, l'intrusion de toutes ces personnes dans les opérations d'arpentage a entraîné une résistance féroce de la part des géomètres. Ceux-ci se sont montrés soucieux d'assainir la profession et d'organiser une déontologie qui avait cessé d'exister depuis la Révolution.

■ Les géomètres-experts contre les mesureurs occasionnels

Au XIX^e siècle, les géomètres ont tenté d'assainir la pratique de l'arpentage. D'une part, en écartant des expertises judiciaires les arpenteurs occasionnels, en particulier les instituteurs. D'autre part, en créant des structures professionnelles.

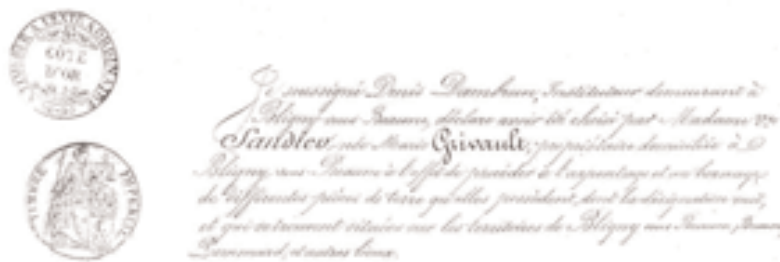
A de nombreuses reprises, les géomètres ont tenté de mettre fin à l'intrusion de personnes étrangères à la profession dans leurs activités. Une véritable guerre s'est engagée à l'encontre des fonctionnaires pour faire cesser leurs agissements dans le secteur privé. Une multitude de pétitions et de plaintes sont formulées par les géomètres. Les premiers visés sont les instituteurs, qui participent très souvent aux arpentages et qui, parfois, entament profondément la clientèle des géomètres circonvoisins. Les actions sont tantôt individuelles tantôt collectives.

De nombreux experts adressent des plaintes auprès de l'inspecteur de l'instruction primaire, du préfet du département ou du ministre de l'Instruction publique, signalant les activités lucratives de l'instituteur, forcément au détriment de l'instruction des élèves. D'autres intentent une action en justice pour obtenir des dommages-intérêts. En 1911, un géomètre déclare ne pas se contenter de dénoncer les agissements des fonctionnaires, en outre, il intente une action en justice devant le tribunal civil dans laquelle il réclame trois mille francs de dommages-intérêts. La défense des intérêts de la profession

est parfois combattue par une assemblée de géomètres. En 1890, la chambre syndicale des géomètres-experts d'Indre-et-Loire imprime, distribue et affiche un avis aux propriétaires. Ce tract les met en garde qu'en vertu de la loi du 30 octobre 1886, il est formellement interdit aux instituteurs de se livrer aux professions d'arpenteur et d'expert. Les plaignants mettent en avant que les agents de la fonction publique, n'étant pas redevables de la patente, peuvent pratiquer des prix très peu élevés ; de plus, les risques d'erreur dans les mesures sont bien plus grands. Mazouer, géomètre-expert à Bléré, expose ainsi dans *L'expert* en 1887 qu'il a été chargé par Berthelot de vérifier une opération d'arpentage exécutée par Baillet, instituteur adjoint à Chisseaux. Se rendant sur les lieux pour vérifier les mesures prises par l'instituteur, il trouva une surface totale de trente-deux ares vingt et un centiares, alors que Baillet avait trouvé trente-trois ares cinquante centiares. Il communiqua alors les résultats au propriétaire qui invita les deux experts sur les lieux le 9 février 1888.

Arrivé sur le terrain, Mazouer protesta énergiquement contre la contenance trouvée par l'instituteur. Il lui demanda pourquoi la contenance indiquée par l'instituteur se trouvait en contradiction avec ses chiffres. Mazouer rapporte que Baillet fut fort embarrassé pour lui répondre et il reconnut que la contenance calculée par le géomètre était exacte alors que celle résultant de son opération était entachée d'erreur. Le géomètre-expert conclut alors : *"vous pouvez apprécier ainsi quel degré de confiance on peut avoir dans les opérations exécutées par les instituteurs lorsqu'ils exercent contre nous leur concurrence déloyale."* Girard, géomètre-expert à Benais et président de la Chambre syndicale des arpenteurs-géomètres d'Indre-et-Loire, lui répond que cette situation, il a pu l'apprécier depuis longtemps. En 1896, Gaillard en appelle à l'unité des géomètres pour faire face à cette concurrence déloyale : *"il faut que tous les géomètres sans exception, s'unissent et marchent résolument à l'assaut ; ce n'est que par l'union qu'ils réussiront à se défendre et à rester maîtres du terrain."*

L'autorité publique n'est pas restée insensible à ces nombreuses réclamations. En 1864, le ministère des travaux publics interdit aux ingénieurs de l'Etat de se charger de travaux privés. L'article 25 de la loi du 30 octobre 1886 prévoit aussi que *"sont interdits aux instituteurs et institutrices publics de tout ordre les professions commerciales et industrielles et les fonctions administratives."* La circulaire du ministre de l'Intérieur du 10 octobre 1909 interdit formellement aux fonctionnaires de se livrer à des travaux en dehors de leur profession, réitérant la circulaire du 8 octobre 1904 qui était restée sans effet. Malgré ces interdictions répétées, les agents de l'Etat continuent leur concurrence au secteur privé et il semble que ces condamnations ne soient pas suivies d'effet. Jules Colas, le gérant du *Journal des Géomètres* se lamente : *"en pratique, l'esprit de la loi est faussé et nous avons vu les architectes, les géomètres et les libraires porter plainte contre les instituteurs pour exercice illégal de leur profession, ne pouvoir faire cesser cet abus de la vente des livres ou de l'exercice de la profession d'architecte ou de géomètre."*



Extrait d'un procès-verbal de bornage rédigé par un instituteur le 8 novembre 1860.

■ ■ ■ Parallèlement à ces attaques répétées, les géomètres commencent à s'organiser pour assurer à leur profession le crédit et le prestige qui lui font encore défaut au XIX^e siècle. Pour cela, il est nécessaire de contrôler l'exercice de la profession. Trop de gens exercent l'arpentage sans en avoir toutes les compétences, ce qui ôte toute confiance envers ceux qui exercent honnêtement et sagement ce métier. La solution proposée tout au long du XIX^e siècle est de créer des structures. Demeufve écrit en 1869 : *"je ne veux pas dire qu'il n'y ait pas d'honnêtes arpenteurs dans mon département, mais des arpenteurs honnêtes et éclairés à la fois sont excessivement rares, et ils sont tellement rares, qu'on a été obligé de s'adresser à des hommes qui ne réunissaient pas complètement ces deux qualités."* En 1887, Allègre, géomètre-expert à Lavoûte-Chilhac, constate que tout citoyen peut s'intituler géomètre et fonctionner comme tel, aussi réclame-t-il instamment une loi qui organise le corps des géomètres : *"aujourd'hui, dans un pays comme la France, n'y a-t-il pas lieu de s'étonner de voir des fonctions aussi importantes et aussi délicates que les nôtres exercées par les premiers venus, par des gens quelquefois sans aveu, par des hommes enfin que les plus tolérants d'entre nous rougiraient d'appeler confrères ? J'avoue que j'aime avec ardeur notre profession, mais que je me suis trouvé fortement humilié dans une circonstance où l'adversaire de mon client avait choisi, pour le représenter, un expert qui prenait cette qualité sans connaître la définition de la ligne droite."* Le constat est général. La liberté d'exercer la profession de géomètre a ouvert la voie à des individus qui n'avaient pas toutes les compétences requises. Bon nombre d'auteurs déplorent le manque de formation et de connaissance de certains géomètres. Abric, expert-classificateur du cadastre, remarque que : *"peu ou point d'experts possèdent la géométrie, quoique en général ils prennent le titre de géomètre."* Selon Teyssèdre, *"l'arpentage est généralement exercé par des routiniers soi-disant géomètres, qui n'ont que des connaissances fort vagues et très imparfaites des premiers éléments des sciences mathématiques ; il est donc fort probable qu'il doit se glisser bon nombre d'erreurs dans leurs opérations."* En l'absence de réglementation, n'importe qui peut s'intituler géomètre. *"Mais qu'est-ce donc alors que le géomètre ?",* se demande un géomètre de Sucy, *Le géomètre, c'est tout individu, instruit ou ignorant, honnête ou fripon, qui, mesurant le sol avec la chaîne ou le compas, juge à propos de s'intituler géomètre."* Lecordier, membre du Comité central des Géomètres de France, se montre plus véhément : *"de même qu'il y a fagots et fagots, il y a aussi géomètres et géomètres. Le simple mesureur de champs est un mesureur mais non un géomètre. Oui, mais le vulgaire fait confusion et appelle géomètres tous ceux qui s'occupent du mesurage des terrains. Etrange confusion : la plupart de ces mesureurs ne connaissent même pas la lecture du plan."*

La volonté de créer des structures s'est manifestée à de nombreuses reprises. En 1822, un juge de paix remarque une lacune dans l'organisation judiciaire : l'absence d'offices d'arpenteurs ruraux, ce qui pose les plus graves inconvénients quant aux garanties des limites des propriétés. En 1847, les

géomètres forestiers, du cadastre et particuliers écrivent une pétition dans le but de demander une loi organique sur l'exercice de leur profession, en faisant remarquer que *"les administrations publiques et les tribunaux mettent souvent en des mains inhabiles les opérations les plus délicates."* A partir de 1838, des comités départementaux sont créés ainsi qu'un comité central des géomètres en 1847, mais ils sont impuissants à faire respecter l'exercice de leur profession. Les géomètres souhaitent également la création d'une école professionnelle de géomètres et d'un diplôme officiel, sans résultat. L'organisation des géomètres belges a été une forte source d'inspiration et un exemple à suivre pour les géomètres français. En Belgique, en vertu de l'arrêté royal du 31 juillet 1825, seuls les géomètres diplômés et assermentés peuvent faire de l'arpentage. La France accusait donc un retard considérable qui a longtemps nui à la réputation du géomètre.

En France, ce n'est que par la loi du 7 mai 1946 que les géomètres-experts obtiennent leur organisation officielle après l'avoir réclamée pendant plus d'un siècle. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, l'ordre des géomètres-experts est créé ainsi qu'une école spéciale et un diplôme officiel : la profession est strictement contrôlée. La pratique de l'arpentage est aujourd'hui l'apanage de quelques savants. Cette situation contraste notablement avec la période située entre 1789 et 1946, où l'arpentage était bien connu des gens de la campagne et pratiqué à la moindre occasion par une population rurale éprise de sa terre. ●

Contact

Ambroise GARLOPEAU

Université de Poitiers

Chargé d'enseignement à l'ESGT

agarlopeau@yahoo.fr

ABSTRACT

From the 13th century, French Kingdom did everything to regulate the surveyor profession: it wanted to offer survey operations every guarantee. In 1789, french revolutionaries destroyed the political system which had been established throughout centuries without replacing it by any new laws. Now, the surveyor profession was free. Anybody who knew the basis of surveying could pretend to be a surveyor. He could do demarcation through justice. In this context, surveyors were victims of a double assault: on the one hand, from occasionally surveyors who often replaced them cheaply; on the other hand by notorious individuals who proclaimed to be a surveyor. Throughout the 19th century, surveyors lead a no mercy fight for the admission of their profession.

Les dessous de Paris

"Cartes sur table"

(1^{re} partie)

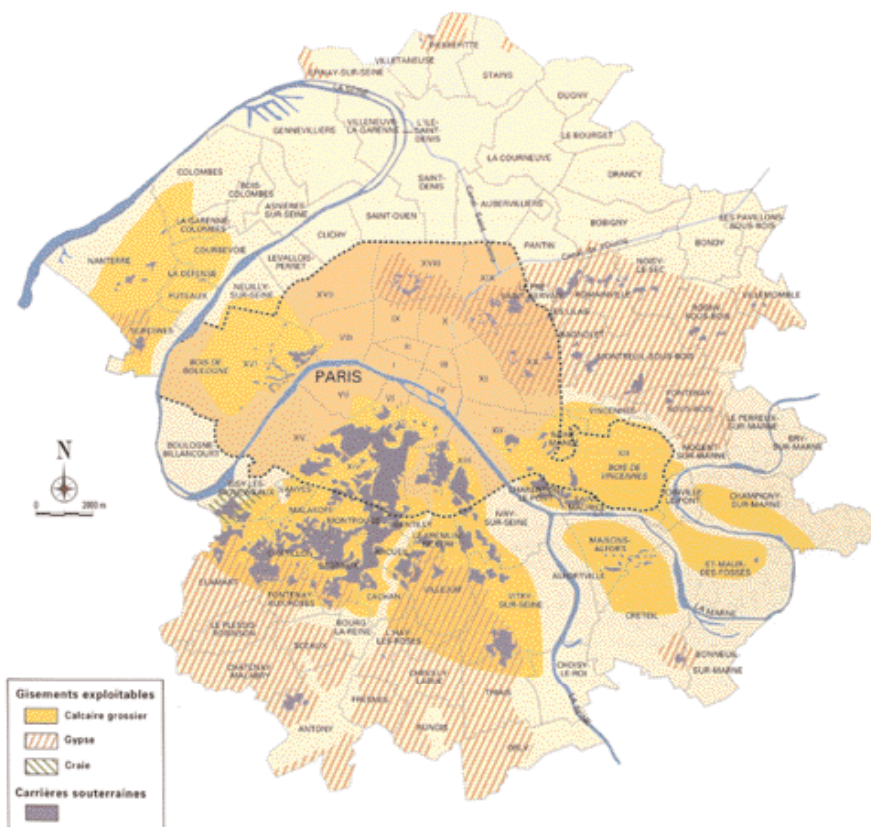
■ Gilles THOMAS

Sous Paris se trouve un réseau de galeries architecturées dont l'histoire remonte à l'extraction des richesses minérales du sous-sol (aux environs du XIII^e siècle), mais qui s'est mis en place à partir de la fin du XVIII^e siècle. Les très nombreuses carrières de calcaire ainsi exploitées souterrainement furent progressivement réunies en trois principaux réseaux unitaires séparés par la Seine et la Bièvre. Pour différentes raisons il fallut en dresser la cartographie la plus précise possible. Depuis quelque temps, le principal réseau est à nouveau fractionné : séparation par isolement des galeries sous l'Observatoire, ensuite celles des Catacombes et de l'hôpital Cochin, de l'hospice Sainte-Anne puis du réservoir Montsouris, etc. Il est bien évidemment indispensable que ces modifications et d'autres liées aux travaux d'urbanisation de surface, soient aussi reportées sur les plans au fur et à mesure de leur exécution afin de maintenir à jour cette cartographie parisienne particulière parce que souterraine, et que nous allons explorer ici.

La cartographie souterraine de Paris : une naissance nécessaire mais difficile

L'exploitation des deux principales richesses géologiques de Paris (calcaire = pierre à bâtir ; gypse = pierre à plâtre), ou du moins de ce qui allait devenir Paris, a commencé dès l'époque gallo-romaine. Mais que l'on ne s'y trompe pas, les méthodes d'extraction se faisaient alors à ciel ouvert ; ce n'est qu'à partir de la fin du XII^e – début du XIII^e siècle que pour des raisons techniques et économiques les carriers "s'enterrent". Ils eurent en effet l'idée de s'enfoncer sous terre pour continuer d'extraire tout en s'affranchissant d'avoir à éliminer les morts-terrains superposés à la couche géologique intéressante, et par la même occasion y laisser la terre végétale utilisable alors pour la culture. Le premier document archivistique connu faisant référence aux carrières souterraines serait la Taille de 1292 qui recense 18 carrières à Paris, ce qui est symptomatique de l'intérêt d'une telle connaissance pour des besoins éminemment fiscaux (en 1300 il n'y aurait plus que neuf carriers).

Autant en surface les diverses propriétés sont aisément identifiables, autant lorsque l'on quitte cet horizon ouvert, il



devient difficile d'identifier les parcelles sous lesquelles on se trouve, d'où l'importance d'avoir à effectuer des levés pour clarifier la situation. Cela évite de se retrouver à creuser sous le terrain du voisin et donc de générer des conflits, quoi que, tant que l'on n'est pas découvert, c'est tout bénéfique, en espérant que cela

dure le plus longtemps possible... Ainsi dans le "Recueil d'actes notariés relatifs à l'histoire de Paris et de ses environs au XVI^e siècle" compilé par Ernest Coyecque (1864-1954) chef de bureau puis inspecteur de la Ville de Paris (deux tomes publiés respectivement en 1905 et 1923), on lit à la date de janvier 1544

■ ■ ■ (art.2859) : *"Renonciation réciproque à toute action de l'un contre l'autre par Nicolas Lambert, tisserand en toiles, rue Neuve Saint-Victor, et Jacques Locart, charpentier de la grande cognée, même lieu, à raison de la pierre et du moellon qu'ils avaient réciproquement extraits sous la propriété l'un de l'autre"*. Outre ces conflits générant l'obligation de dresser un plan, cette nécessité peut aussi parfois s'avérer indispensable au moment d'une succession.

Cet impératif de dresser une cartographie est aussi apparu lors de travaux de construction d'un certain nombre de monuments, à partir du moment où Paris s'était suffisamment étendu pour venir recouvrir d'anciennes exploitations souterraines ouvertes quelques siècles plus tôt. Ainsi lors de l'édification du couvent (église et cloître) du Val-de-Grâce dévolu aux Bénédictines du Val-Profond (à Bièvres le Chastel), sans la présence à l'esprit de l'existence d'anciennes carrières, ces religieuses auraient très bien pu rejoindre juste-

ment les profondeurs de la capitale. Les maçons Augustin Monnard et Simon de Lespine avaient fait un relevé des travaux à effectuer dans les anciennes carrières sous-jacentes, et l'architecte François Mansart qui avait commencé les travaux à partir de 1645 fut remercié (si les faits s'étaient déroulés après 1914 il aurait même été Limogé !) pour avoir dépensé la quasi-totalité de son enveloppe budgétaire à des travaux de confortations pourtant indispensables pour asseoir les bâtiments à édifier.

Il fut de suite remplacé par Jacques Lemercier, architecte de la Sorbonne, qui poursuivit donc les travaux. Les Capucins furent confrontés au même problème avec leur noviciat (qui deviendra plus tard l'hôpital Cochin) en 1653, puis Claude Perrault (frère de Charles, le fabuliste) en 1672 avec l'Observatoire. Ces travaux de consolidation deviendront généraux et seront réalisés a posteriori sous le bâti parisien à la fin du XVIII^e siècle, avec la création

de l'Inspection des carrières (le 4 avril 1777), la première du nom en France. Devant tant d'exploitations souterraines, le législateur avait bien essayé de mettre un peu d'ordre en essayant d'imposer la réalisation d'une couverture cartographique, mais il s'était trouvé confronté à une réticence manifeste.

A titre d'exemple, le premier acte que nous prendrons en compte est un arrêt du Conseil d'Etat du Roy, du 9 mars 1633, faisant de par le Roy *"Très expresses inhibitions et défenses de fouiller à 15 toises près des grands chemins, conduits de fontaines et autres ouvrages publics, à peine de punition corporelle et amende arbitraire"*. Etais chargé de la surveillance de l'application de cette ordonnance le Lieutenant général au bailliage de la Varenne du Louvre (le bailliage intervenait dans les délits commis dans les cantons affectés aux chasses royales, et qu'on nommait pour cela "Plaisirs du Roi").

Le 29 mars 1754, le Bureau des Finances, après avoir rappelé les dispo-

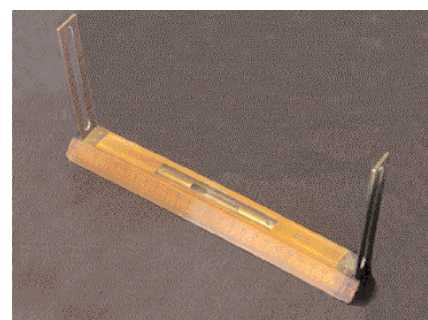
© Franck Charbonneau



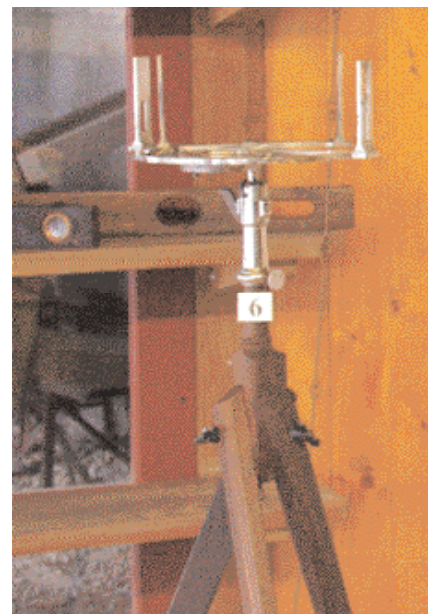
Photo d'un dessin de "levé à la planchette", trouvé sur une paroi des galeries de servitude de l'IDC dans le 13^e arrondissement. Cet appareil était utilisé pour mesurer les angles, le plan étant dessiné lors du levé, à la main, sur une feuille de papier posée sur la planchette.

Photos de deux alidades prises lors d'une exposition temporaire sur les outils d'arpenteur au Musée des Vieux Métiers à Saint-Laurent de la Plaine (Maine-et-Loire). L'alidade, c'est le "viseur" que l'on pose sur un trépied lors du "levé à la planchette".

"C'est le commun sentiment des meilleurs géomètres, que l'usage de la planchette, quand il s'agit de lever des plans d'une longue étendue, soit le meilleur et le plus exact moyen", selon un auteur anonyme du XIX^e siècle.



© Robert Chardon



© Robert Chardon



Plan des carrières et des consolidations sous la rue de la Santé, entre le champ des Capucins et le jardin de "l'hôpital vénérien" (actuel hôpital Cochin). Ce levé a été exécuté en l'an 4, sous l'Inspektorat de Bralle.

© Robert Chardon - BN F13 741-742

Plan des carrières sous le jardin des Sourds-muets (angle de la rue de l'Abbé de l'Épée et de la rue St-Jacques), la rue d'Enfer étant l'actuelle rue Henri Barbusse (en 1813, Héricart de Thury était l'Inspecteur général des carrières).

sitions de l'arrêt du 14 mars 1741 (qui faisait aussi défense sous peine d'amende à toute personne d'ouvrir ou d'exploiter aux abords des routes et grands chemins aucune carrière de quelque espèce que ce fût, dans la distance de 30 toises du pied des arbres qui les bordent, ou de 32 toises de l'extrémité de leur largeur, quand ils ne sont pas bordés de plantations), avait ordonné qu'il soit donné un état de toutes les carrières existantes.

Puis le 17 mars 1761 le Bureau avait pris sa seconde ordonnance concernant l'établissement d'un état général des carrières existant dans la banlieue de Paris et du plan de ces carrières "si besoin était". Ce qui n'était toujours pas appliqué puisque par une ordonnance de police de 30 avril 1772, le Bureau des



© Robert Chardon - BN F13 741-742

Finances donnait pour la troisième fois l'ordre de dresser un état général des carrières et d'en lever les plans.

1777 : un service est entièrement dédié à la topographie souterraine parisienne

Le 15 septembre 1776, fut alors commis le sieur Antoine Dupont en qualité d'in-

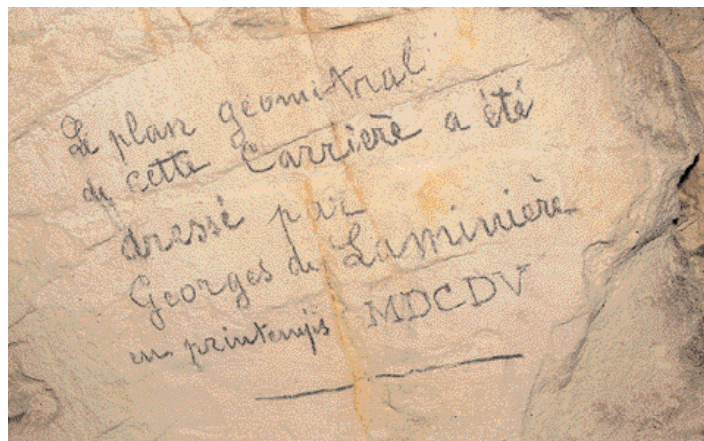
génieur, chargé de surveiller les carrières et fouilles faites dans la banlieue de Paris pour l'extraction de tous matériaux de construction, de constater leur état, et d'en lever les plans. Dupont étant mathématicien et donc maîtrisant la géométrie, ce qui signifie capable de dresser des plans, le Roi en son conseil, ordonna en effet "que toutes les carrières seraient incessamment visitées par le sieur Dupont, ingénieur nommé

■■■

© DR collection particulière



Photo de l'actuel bâtiment de l'Inspection des Carrières, mais à une époque où était encore visible l'inscription "Inspection générale des carrières de Paris et du département de la Seine" qui a été complètement effacée lors d'un ravalement. Cette inscription emblématique n'est plus visible que sur une seule porte d'une servitude de l'IDC.



© Jean-François Weiss

Inscription visible dans une carrière à Colligis-Crandelain (Aisne) montrant que ce problème de la topographie des carrières souterraines fut récurrent dans toutes les régions sous-minées, et évoquant par-là même l'épopée que furent les premiers levés souterrains, ici au printemps 1905.

■ ■ ■ et commis pour prendre connaissance desdites carrières, lever les plans partout où elles s'avanceraient sous les grands chemins, rues, ou maisons de Paris et marquer sur lesdits plans tous les endroits qui manqueraient de soutien et pourraient être en péril". Dupont était en outre autorisé à ouvrir une Ecole de géométrie souterraine "à l'effet de former des élèves qui puissent remplir les mêmes fonctions dans les provinces". Il devait remettre ces plans, rapports et procès-verbaux qu'il dresserait à l'Inspecteur général du pavé de

Paris, lequel, après les avoir visés, devait les adresser au procureur du Roi près le bureau des Finances. Antoine Dupont, professeur de Mathématiques, demeurait alors rue 38 Neuve Saint-Médéric (quartier du Temple), où il "tient chez lui cours de Géométrie, de Physique et de Dessin, et donne tous les dimanches matin des leçons gratuites aux pauvres Ouvriers" (dans le Watin on lit aussi "cours de géométrie, de trigonométrie, de mathématiques et d'hydrographie, par le sieur Dupont"). Par un nouvel arrêté pris par Louis XVI le

4 avril 1777 (qui suspendit l'effet de celui de septembre 1776), fut enfin créée une Commission des carrières composée de MM. Lenoir (lieutenant général de Police) et le Comte d'Angivilliers (directeur des bâtiments du Roi), qui nommèrent Charles-Axel Guillaumot premier "Contrôleur et Inspecteur général en chef des visites et opérations relatives aux carrières de Paris et plaines adjacentes". Celui-ci venait de visiter les carrières du Val-de-Grâce et celles sous l'aqueduc d'Arcueil en présence de deux autres architectes (Soufflot et Brébion) à la demande du comte d'Angivilliers. Il y avait urgence puisque le jour même de sa prise de fonction, à 11h du soir, Guillaumot dut se porter rue d'Enfer, vis-à-vis le Luxembourg, pour indiquer les mesures propres à empêcher la ruine complète d'une maison dont une partie venait de s'effondrer dans une excavation de près de 20 mètres de profondeur. Il devenait plus qu'urgent de dresser le plan le plus précis possible des vides sous-minant Paris ; il y avait en effet "péril imminent dans tout Paris", ce qu'évoquent certains écrits de cette époque. "Avant l'année 1777, les temples, les palais, les maisons d'habitation, et les voies publiques de plusieurs quartiers de Paris et des environs, étaient prêts à s'abîmer dans des gouffres immenses par leur profondeur comme, par leur étendue" dira Guillaumot lui-même dans son "Mémoire sur les travaux ordonnés

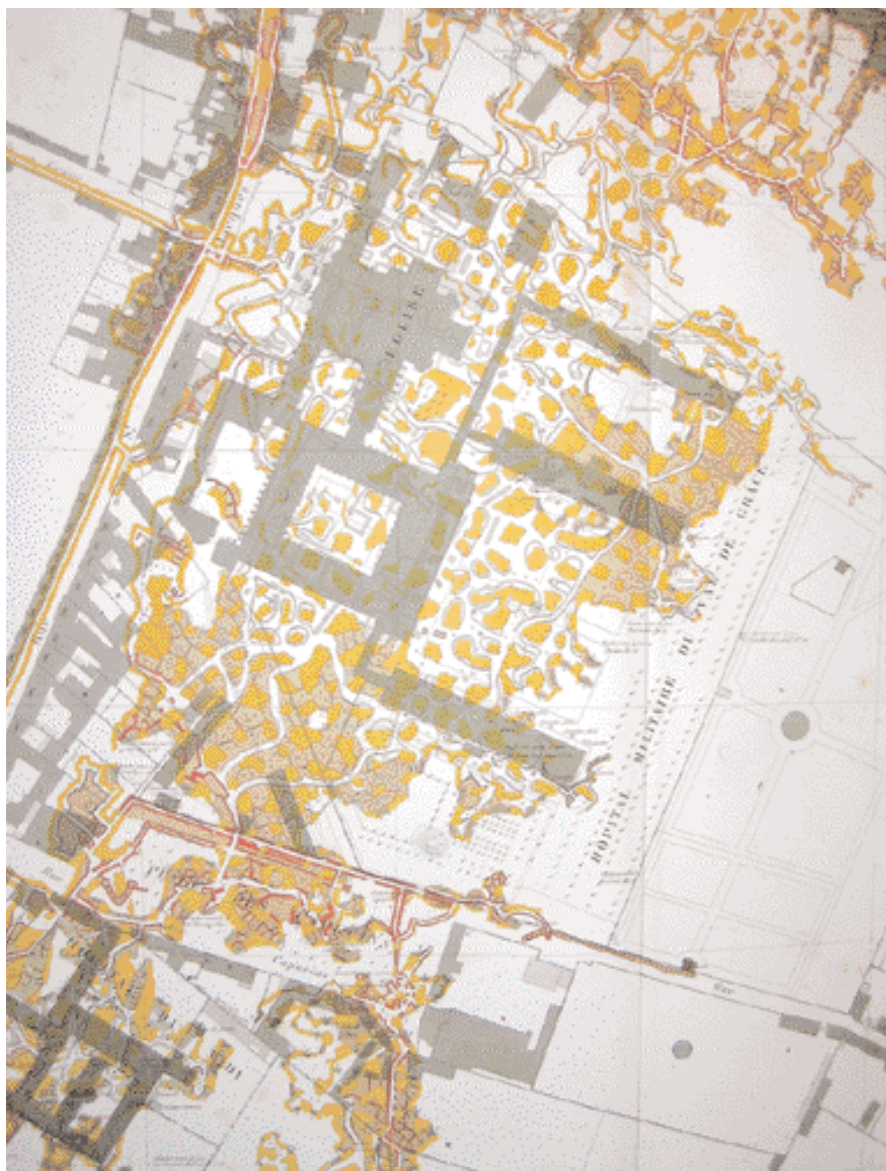
© Robert Chardon



Partie des carrières qui sont sous les maisons de la rue Saint-Jacques. Ce plan a été levé en 1777 par Antoine Dupont, professeur de mathématiques, ayant alors le titre d'"ingénieur du Roy".

dans les carrières sous Paris, et plaines adjacentes” publié en 1797. *“Tout ce qu’on voit en dehors, manque essentiellement dans la terre aux fondements de la ville : de là les concavités effrayantes qui se trouvent aujourd’hui sous les maisons de plusieurs quartiers ; elles portent sur des abîmes. Il ne faudrait pas un choc bien considérable, pour ramener les pierres au point d’où on les a enlevées avec tant d’effort. (...) Que de matière à réflexions, en considérant cette grande ville formée, soutenue par des moyens absolument contraires ! Ces tours, ces clochers, ces voûtes des temples, autant de signes qui disent à l’œil : ce que nous voyons en l’air manque sous nos pieds”,* nous dit Louis Sébastien Mercier. Celui-ci précise même, après avoir visité les carrières de l’Observatoire : *“C’est une ville souterraine, où l’on trouve des rues, des carrefours, des places irrégulières. On regarde au plancher, tantôt bas, tantôt plus élevé ; mais quand on y voit des crevasses, et que l’on réfléchit sur quoi porte le sol d’une partie de cette superbe ville, un frémissement secret vous saisit, et l’on redoute l’action de la force centripète. (...) Et l’on boit, et l’on mange, et l’on dort dans les édifices qui reposent sur cette croûte incertaine”.*

L’Inspection des Carrières (= IDC), dès sa constitution eut donc un triple rôle : rechercher tous les vides issus d’anciennes exploitations souterraines, en dresser la cartographie, et consolider ce qui était sous les voies publiques et bâtiments du roi (pour une simple raison de droit, l’article 552 du code civil stipulant que de la propriété du sol découle celle du sous-sol). Son premier inspecteur, Charles-Axel Guillaumot, avait aussi vu l’intérêt de présenter les travaux de consolidation aux élèves de polytechnique, ainsi que le montre sa lettre datée du 22 floréal an 6 (11 mai 1798) : *“L’inspecteur général des carrières du département de la Seine au ministre de l’intérieur. / Citoyen ministre, je ne vois aucun inconvénient à ce que les élèves de l’école polytechnique prennent connaissance des travaux qui se font pour le soutènement des carrières*



C’est François Mansart qui, lors des travaux d’édification de l’abbaye du Val-de-Grâce au XVII^e siècle, se trouva le premier confronté à la présence dans ce secteur de carrières souterraines qu’il fallut lever, travail effectué par les maçons Augustin Monnard et Simon de Lespine en 1645. Devant l’ampleur des consolidations à réaliser au niveau des carrières afin de pouvoir construire au-dessus, Mansart consumma en totalité l’enveloppe budgétaire qui lui avait été allouée pour la construction de l’église, ce qui entraîna sa disgrâce, sa destitution et son remplacement. Plan des carrières du Val-de-Grâce, extrait de “l’Atlas souterrain de la ville de Paris” de Eugène De Fourcy (Paris 1859). (collection particulière)

sous Paris. J’y vois au contraire pour moi l’avantage de les soumettre au jugement des instituteurs éclairés de cette école, et de profiter de leur avis, ou d’être honoré de leur approbation. Je vais, en consé-

quence, concerter avec ces instituteurs et avec le directeur de cet établissement important, le jour où nous pourrons en faire la visite. / Salut et Respect.”

1 - François Benoit Husset, né le 1^{er} mars 1751 à Paris, fut nommé dans le Corps des Mines le 25 mars 1811 ; ce fut peut-être une admission fictive ou bien rétroactive à l’École des Mines, prononcée en 1811 et destinée à le faire entrer dans le Corps. Louis Hubert Caly, né le 30 décembre 1756 à Versailles, nommé sous-ingénieur dans le Corps des Mines en 1779, fut titularisé ingénieur à cette même date du 25 mars 1811 ; c’est peut-être aussi le même cas d’admission fictive ou bien rétroactive à l’École des Mines.

■ ■ ■ L'IDC se livra à un travail de longue haleine (globalement de 1776 à 1909), pressenti dès l'origine par Guillaumot : *"Le mal des carrières est celui de plusieurs siècles ; il ne peut donc pas être réparé dans un petit nombre d'années. Ni moi, ni mes coopérateurs n'en verront la fin. D'autres auront cet avantage ; mais j'ai lieu de croire que nous leur avons frayé la route, et qu'ils n'auront rien d'essentiel à changer au système que j'ai adopté."* Le réseau de galeries architecturées par ce service (près de 300 km) a de plus été superbement cartographié par les géomètres-topographes de l'Inspection des carrières, et ce dès l'origine, le premier étant Husset ¹, *"ingénieur en chef pour la levée des plans, indications des points et directions pour l'établissement des constructions, et pour celles des percemens (sic) de galeries ; et Caly, son aide et digne second pour les mêmes opérations"*. (on note aussi à la même époque *"Henry, dessinateur au bureau de M. Guillaumot, et Margillière, premier dessinateur au bureau de M. Husset"*).

En 1842 il fut décidé de coordonner les milliers de plans produits par le service des Carrières depuis sa création. L'ouvrage résultant a été réalisé de 1856 à 1859 sous l'impulsion du futur Inspecteur général Eugène Lefébure de Fourcy (qui le sera de 1866 à 1870) ; il ne comptait alors que 17 planches (format 1 m x 0,60) au 1/1000^e, élaborées à partir de plans-minutes levés sur le terrain à l'échelle du 1/216^e (correspondant à 4 lignes pour une toise) qui furent assemblés et réduits pour être superposés au cadastre (c'est la première édition d'un plan des carrières souterraines à cette échelle). A cette réalisation, il convient d'ajouter le "plan des Catacombes de Paris dressé par les Géomètres de l'Inspection des carrières sous la direction des Ingénieurs des mines" en 1857, accompagné d'une notice historique et statistique dans la marge (format 40 cm x 25 cm). Ce premier Atlas est de nos jours connu sous la dénomination de "Atlas de Fourcy", mais quand il fut édité, l'Inspecteur général était Charles Louis Ernest de Hennezel d'Ormois (Inspecteur de 1858 à 1865). Entre-temps se déroula l'ins-



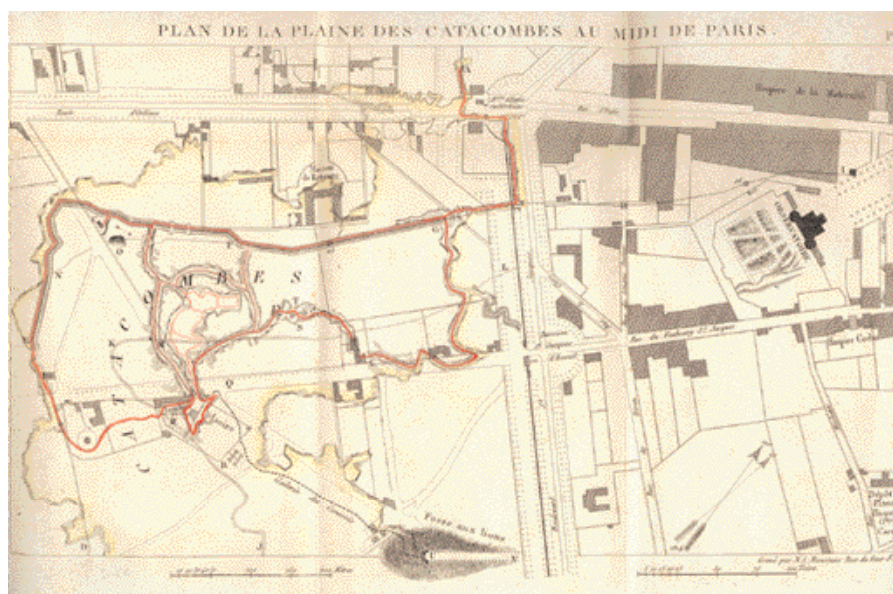
Extrait de "l'Atlas souterrain de la ville de Paris" d'Eugène De Fourcy (Paris 1859) montrant la zone de carrières sous l'hôpital du midi, correspondant au plan de 1777 de Dupont reproduit sur la page 64. (collection particulière)

pectorat de Charles Aimable Alban Judas – du Souich, plus connu sous le simple nom de "du Souich". Cet Atlas *"constitue 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"*.

1871 la Commune : une année noire pour l'administration des carrières

Si l'année 1871 est une année noire pour Paris, elle reste de la même manière et pour les mêmes raisons mémorable dans les annales de la direction de l'Inspection des carrières. L'insurrection, qui éclata le 18 mars,

demeura un événement purement parisien qui ne put s'exporter, la Commune ne demeurant maîtresse de la capitale que pendant soixante-douze jours. Mais ce court laps de temps fut suffisant pour y accumuler des ruines. La colonne Vendôme fut mis à bas ("déboulonnage" dont la responsabilité revint au peintre Courbet ; "démontage" aurions-nous dit de nos jours !) le 26 floréal an 79 (16 mai 1871), prélude à la semaine sanglante du 21-28 mai 1871. Au cours de cette semaine, les Communards se défendirent par un moyen auquel aucune des trois révolutions précédentes n'avait eu recours : l'incendie de la capitale. C'est ainsi que des équipes de pétroleurs arrosèrent de liquides inflammables les Tuileries, le petit palais de la Légion d'honneur et celui de la Cour des comptes, la manufacture des Gobelins, des maisons particulières, ainsi que l'Hôtel de Ville et ce pour le plus grand malheur de l'IDC. En effet les archives de l'Inspection avaient été transférées à l'Hôtel de Ville peu de temps auparavant dans le souci louable de les mettre en sécurité. Elles furent totalement détruites dans l'in-



Extrait de "Description des Catacombes de Paris" écrit en 1815 par Héricart de Thury.

cendie qui ravagea non seulement la bibliothèque municipale installée dans les combles et riche de quatre-vingt mille volumes (dont plusieurs milliers de manuscrits : pas un seul n'en réchappa !), mais aussi les Archives de la Seine. L'ingénieur des mines Descos attaché à l'Inspection générale des carrières de la Seine, entreprit alors de nombreuses et laborieuses recherches pour retrouver dans divers bureaux, quelques expéditions des plans détruits.

Les dernières planches de l'Atlas de Fourcy venaient d'être achevées quand Paris annexa les communes suburbaines le 1^{er} janvier 1860. Il avait donc fallu dresser de nouveaux plans correspondant aux voies nouvellement entrées dans le giron parisien, qui étaient encore à l'état de minutes, de même que le report de tous les travaux exécutés entre 1859 et 1871... dont la destruction fut une perte considérable. Un arrêté préfectoral du 24 août 1871 ordonna la reconstitution de la collection des plans et coupes des carrières souterraines de Paris.

Tous les vides et galeries toujours accessibles, furent à nouveau topographiés, les diverses administrations publiques et privées, les architectes, les géomètres, les notaires, les entrepreneurs, toutes personnes pouvant posséder des documents dans leurs archives furent sollicitées. Keller (futur

Inspecteur des carrières, de 1885 à 1896) sera mis à la disposition du préfet de la Seine le 8 mai 1872 pour procéder à la reconstitution du plan souterrain de Paris détruit pendant l'incendie de l'Hôtel de ville. Il resta dans le même temps attaché au service du contrôle de l'exploitation des chemins de fer de l'Est, et n'entra complètement à l'IDC que le 29 octobre 1872 (il y aura une prolongation le 8 novembre 1894).

L'insurrection avait aussi complètement désorganisé ce service. La plupart des agents avaient dû être révoqués, parce qu'ayant pactisé avec la Commune. Et la révolte des ateliers avait rendu des licenciements nécessaires. L'Inspection dut donc se remettre au travail, sans plans, et avec un personnel qu'il fallait pour une bonne part former. De plus, au cours de cette année l'Inspektorat de Jacquot sera interrompu, la période intérimaire étant assurée par Lantillon. Puis Jacquot reprendra son poste d'Inspecteur général, ce qui pour cette raison, rendra son mandat comparable à celui de Guillaumot, puisque lui aussi officia en pointillé, cette caractéristique étant donc propre à ces deux périodes troubles que furent la Terreur et la Commune. ●

Contact

Gilles THOMAS

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

Bibliographie

"Le Watin ; Etat actuel de Paris ou le Provincial à Paris" éditions datées de 1787 à 1790 ;

"Paris souterrain", par Emile Gérards, édition Garnier Frères © 1908 (réédité en 1991 par DMI) ;

"Inscriptions et graffiti dans les carrières de Paris", étude de Robert Chardon en 1987 (27 pages) ;

"Recueil d'actes notariés du 16^e siècle relatifs aux carrières", par Daniel Petit, p. 33-42, in *"Liaison SEHDACS"* n° 9 (1989) ;

"Carrières souterraines". Actes du 2^e Symposium International sur les Carrières Souterraines qui s'est déroulé à Paris – Meudon du 8 au 13 juillet 1989 (©DMI 1991) ;

"La Cartographie à l'Exposition Universelle de 1900", par Emm. de Margerie et Louis Raveneau (publié par la Librairie Armand Colin) ; extrait des *"Annales de Géographie"*, tome IX, 1900, n° 46 du 15 juillet p. 291-312, et n° 48 du 15 novembre 1900 ;

"Un Atlas parisien. Le dessus des cartes", par Antoine Picon et Jean-Paul Robert (aux éditions Picard 1999) ;

"Recueil d'actes notariés du XVI^e siècle relatifs aux carrières", par Jean-François Weiss, p.62-126, in *"Liaison SEHDACS"* n° 16 (2004) ;

"Les plans de Paris. Histoire d'une capitale", par Pierre Pinon et Bertrand Le Boudec (©Le Passage 2004).

ABSTRACT

Below Paris exist galleries remaining from the old limestone quarries, which date from the beginning of the XIIIth century. At the end of the XVIIIth century, the General Inspection of the Quarries was created to repair and fortify the city streets, as well as to draw up exact maps of the more than 250 km of mysterious tunnels. That official map has now been created but there also exist other maps made by illegal explorers of the catacombs (named "cataphiles") in order to move more easily through the underground streets.

Peter Stämpfli :

■ Jean-Pierre MAILLARD

Dole, sous-préfecture du Jura, fait partie du cercle restreint des "villes et pays d'art et d'Histoire" qui regroupe 115 communes et pays attachés à la valorisation et l'animation de leurs patrimoine et architecture. Le réseau national, encadré par le ministère de la Culture et de la communication, contribue depuis 1985 à une politique d'information et de valorisation en partenariat avec les collectivités territoriales (communes ou intercommunalités). Elle se concrétise par l'attribution d'un label "Ville d'art et d'Histoire" ou "Pays d'art et d'Histoire" dans un cadre contractuel.

Une convention, élaborée avec la direction de l'architecture et du patrimoine, les directions régionales des affaires culturelles et les collectivités concernées, formalise les engagements réciproques portant notamment sur la conduite de missions éducatives destinées prioritairement aux scolaires.

Cette convention définit le soutien financier et technique du ministère et comporte, pour les collectivités, l'obligation de former et recruter un personnel qualifié (guides-conférenciers et animateurs du patrimoine) soumis à l'agrément du ministère.

Créé en 1995, le Conseil national des villes et pays d'art et d'Histoire, participe à la politique du réseau, à son développement et émet un avis sur les candidatures au label (déposé à l'Institut national de la propriété industrielle) ainsi que sur le retrait de ce dernier pour non-respect du cahier des charges de la convention.

Le Musée des Beaux-arts

Forte de mille ans d'existence et d'un passé qui l'a vu un temps capitale de la Franche-Comté, Dole est riche de constructions de tous âges en tous points remarquables. Le Musée des

Beaux-arts participe à l'inventaire. Il est installé dans ce qui était, au XVIII^e siècle, le pavillon des Officiers. La façade ornée d'arbres et d'attributs guerriers rappelle la fonction d'origine. Comme dans tous les musées de province, on y trouve un ensemble de tableaux de toutes époques, réalisés le plus souvent par des artistes locaux dont le renom de certains, tel Gustave Courbet, a dépassé les limites de la Franche-Comté.

Depuis 1983, pour aussi témoigner de son époque, le musée a constitué une collection d'art contemporain rassemblant principalement des œuvres d'artistes ayant produit en France dans les Trente Glorieuses cataloguées depuis sous l'appellation "Nouvelle figuration". L'expression picturale emprunte alors à la bande dessinée, à la photographie et à la publicité. Les œuvres traitent de l'actualité, d'objets d'une simple banalité ou au contraire abordent sans retenue des sujets même politiques dans une dispersion qui va de pair avec le développement de la société de consommation. Cette mouvance naît en alternative à l'abstraction lyrique alors prépondérante. Elle est "Figuration narrative" en particulier avec les Malassis, et se manifeste par les Nouveaux réalistes ou encore les Objecteurs dont la production est présente à Dole.

Le musée présente sous les combles sa collection d'art contemporain et réserve au rez-de-chaussée un espace pour les expositions temporaires dont l'attractivité dépasse cette fois largement la région. Ce rayonnement est dû à la volonté conjuguée de la ville, encouragée par les subventions de l'Etat, de la région et des dépôts significatifs du Fonds national d'art contemporain (FNAC).

Orion

Réalisée en 1987 cette huile sur toile de 2,00 m sur 2,78 m se distingue de toutes les autres par sa facture "abstraction géométrique". Composée de triangles et de polygones réguliers, elle attire l'œil par sa dimension et



Jean-Pierre Maillard

l'empreinte du pneu

Jean-Loup Mathieu



Peter Stämpfli

Né en 1937 en Suisse, Peter Stämpfli manifeste dès l'enfance un goût certain pour la peinture. C'est pourquoi il entre en 1954 à l'école des Beaux-arts de Bienne avant de rejoindre deux ans plus tard le professeur Max von Mühlenen à Berne puis, dès 1959, Paris dans un atelier du Bateau-Lavoir. C'est en France qu'il trouve une reconnaissance significative. A partir de 1963 il participe à de nombreuses expositions en particulier celles organisées par le Musée d'art moderne de la ville de Paris et représente son pays, la Suisse, dans diverses manifestations internationales.

Il s'essaie par ailleurs au cinéma en réalisant notamment *Firebird* (1969) et *Ligne continue* (1974) pour lequel Daniel Humair a créé un accompagnement de batterie. Le premier sujet traite de l'automobile en magnifiant les roues et les chromes, le deuxième des bandes jaunes de la route. C'est une façon de sortir de la toile et d'aborder d'autres expressions plastiques.

Sa recherche définitivement centrée sur la roue et son pneu le classe aussi dans le sillage des artistes américains qui travaillent aux confins de la bande dessinée, Andy Warhol et Roy Lichtenstein pour lesquels il a une réelle admiration et auxquels il doit une partie de son inspiration. En 1990 il a eu à vivre l'incendie qui a ravagé son atelier du quai de Seine à Paris et détruit une part notable de son travail. Il a su surmonter l'épreuve et continue à former, du sol au plafond, la trace si caractéristique laissée par ses pneus démesurés dans de nombreux musées et galeries du monde comme, tout récemment, au MAC/VAL de Vitry-sur-Seine.

Son travail obsessionnel laisse réciproquement une trace dans l'esprit de tout un chacun qui connaît son œuvre puisqu'il ne peut plus désormais voir une empreinte de roue dans la boue ou la sculpture d'un pneu sans penser un peu à lui. ●

l'aplat de ses couleurs vives. Même le noir contribue à la gaîté de la composition en donnant également la perception de la troisième dimension. On devine rapidement qu'elle s'inscrit dans le prolongement des autres réalisations présentées, à dominante figurative, et qu'à sa manière elle l'est aussi.

Peter Stämpfli s'est employé à partir de 1962 à peindre sur des très grands formats son environnement immédiat : chaussure, paquet de cigarettes, goulot de bouteille, tomate, lavabo, bouche... dans une recherche minimaliste, en dégagant pour chaque objet un trait de caractère exprimé de façon hyperréaliste. L'opposition entre la grande taille des toiles et le dépouillement pictural est un premier aboutissement du travail de l'artiste.

Son regard s'est ensuite porté sur les automobiles en le focalisant sur tel pare-choc, telle roue, pour être enfin irrésistiblement attiré par les pneus. Comme le chercheur accroché à son microscope pour en savoir plus, Peter

Stämpfli élargit son centre d'intérêt jusqu'au détail des nervures. C'est alors que *"le pneu perd progressivement sa réalité au profit d'une structure spatiale illusionniste dont le contenu physique et l'impact optique se suffisent à eux-mêmes"* (Pierre Cabanne). Orion est un des multiples exemples de la série des empreintes de pneu confectionnée par le créateur. Il décline à l'infini sa passion pour les traces de la gomme qu'il a aussi créées sous forme de sculpture. Ainsi le gazon de la place Barberousse de Dole porte une empreinte de 30 m de long et 3 m de large, agrandissement gigantesque du négatif du dessin d'un pneu. Malheureusement la pièce de polyester a beaucoup souffert de l'outrage du temps et de son accessibilité au public. L'illustration ci-contre présente l'exemplaire implanté dans le parc Petit Leroy de Chevilly-Larue (Val-de-Marne), mieux conservé.

L'art abstrait de Peter Stämpfli est donc l'un des rares qui soit directement dérivé du figuratif et, le sachant, peut être également regardé comme tel.

XYZ a reçu nombre de témoignages suite au décès de Roger Schaffner. Nous tenons à publier celui adressé par Louis Tschaen.

J'ai fait la connaissance de Roger Schaffner en automne 1993, lorsqu'il a été chargé par le président de l'AFT d'organiser la mise au point de la partie française du dictionnaire technique multilingue de la Fédération Internationale des Géomètres. En effet cet organisme, étant donné l'évolution des techniques, avait, il y a une quarantaine d'années, formé le projet d'actualiser le contenu de son dictionnaire multilingue, dont la dernière édition datait de 1959.

L'Institut de la Géodésie Appliquée (IfAG) allemand de Francfort a été chargé de la réalisation de ce projet et a présenté les premiers volumes de ce nouveau dictionnaire au Congrès de la FIG tenu à Wiesbaden en 1971. Mais le développement des techniques continuant de progresser de plus en plus rapidement, cette édition ne donnait plus satisfaction et une nouvelle mouture s'avérait nécessaire. Elle devait être présentée au 20^e Congrès de Melbourne en mars 1994.

C'est encore l'IfAG qui fut chargé de l'élaboration de cette nouvelle édition du dictionnaire. Des commissions se réunirent pour en fixer le nombre de volumes et pour faire le choix des termes avec leur définition allemande, qui devaient y figurer. La succursale de l'IfAG de Leipzig a été chargée de rechercher les termes équivalents en anglais et en français. Ensuite les expressions proposées devaient être vérifiées par des experts dont la langue maternelle était soit l'anglais, soit le français.

C'est dans ces conditions que Roger Schaffner, qui était chargé d'organiser la collaboration de l'AFT avec cet organisme allemand, a tenté de former un groupe de travail d'experts bilingues français-allemand en vue d'effectuer la vérification des termes équivalents des quatre premiers volumes disponibles du dictionnaire. Le groupe d'experts

bénévoles ainsi formé lors de la réunion du 29 décembre 1993 comprenait Messieurs Schaffner, Faber, Koecher et Tschaen qui ont immédiatement entrepris la vérification des premiers volumes suivants :

vol. 4 Cadastre parcellaire et travaux fonciers

vol. 10 Topométrie industrielle et de génie civil

vol. 14 Remembrement

vol. 5 Instruments géodésiques et topographiques.

En décembre 1994, le contrôle de ces quatre volumes était achevé. Puis d'autres volumes de ce dictionnaire ont été élaborés par les commissions et groupes de travail allemands. Leur vérification a alors été organisée par Messieurs Schaffner et Tschaen, qui se sont investis personnellement en faisant toutefois appel en cas de besoin à des experts plus qualifiés. C'est ainsi qu'ont été traités les volumes suivants :

vol. 3 Etablissement des réseaux de base
MM. Boucher, Schaffner et Tschaen

vol. 6 Topographie
M. Tschaen

vol. 11 Levers Hydrographiques
MM. Bourgoïn et Roubertou

vol. 12 Topométrie souterraine
MM. Schaffner et Kieffer

vol. 13 Evaluation foncière
M. Klopfenstein, OGE.

vol. 15 Planification urbaine...
M. Klopfenstein OGE.

vol. 17 Généralités
MM. Schaffner, Durassel et Tschaen

Malgré ses ennuis de santé suite à une attaque cérébrale en 1995, Roger Schaffner a tenu à continuer à collabo-

rer à la réalisation de cette œuvre de longue haleine.

Actuellement, il ne reste plus qu'à traiter, les volumes suivants :

vol. 1 Calcul de compensation,
volume pratiquement terminé

vol. 2 Géodésie volume en cours

vol. 7 Photogrammétrie
volume pratiquement terminé

vol. 8 Cartographie volume en cours

Au cours de la dizaine d'années de notre collaboration intense, j'ai particulièrement apprécié son dynamisme et sa serviabilité. Il m'a notamment rendu de grands services à l'occasion de mes recherches sur un cadastre napoléonien de la région Alsace et son évolution jusqu'à nos jours, en partageant ses connaissances approfondies du Livre Foncier d'Alsace et de Moselle et en m'offrant aimablement un exemplaire de son mémoire de fin d'études de l'Institut des Hautes Etudes de Droit Rural et d'Economie Agricole présenté en 1982 et intitulé "Organisation et garantie de propriété par le livre foncier" ●

Louis TSCHAEN

Dictionnaire multilingue de la FIG

La commande des ouvrages est possible par Internet sur le site allemand du "Bundesamt für Kartographie und Geodäsie" (bureau fédéral de cartographie et de géodésie) : <http://webserver.bkg.bund.de/GI/Shopp/index.html> - Dans la rubrique "wissenschaftliche Veröffentlichungen" (publications scientifiques) - Le prix des volumes est compris entre 6 € et 21,60 €.

A propos de N48°26'58" : le plus long parallèle de France

■ Claude MILLION

On a pu lire, avec un intérêt très vif l'article indiqué en titre, dans XYZ n°106 -p. 53, dans lequel les auteurs Kadida Drame, Guillaume Bizouard, et Alban Vuillemeys recherchent le plus long parallèle de France. Il se situerait entre l'extrémité Ouest de l'île d'Ouessant et la frontière avec l'Allemagne. Il s'agissait d'en trouver la longueur maximale, c'est ce que ces auteurs ont tenté de faire. Toutefois, la méthode qu'ils emploient n'est pas la plus simple, ni la plus directe, ni même la plus précise. Il aurait été plus facile de transformer les coordonnées "Lambert Zones" en coordonnées géographiques longitude et latitude sur leur référentiel commun, c'est-à-dire Clarke de la NTF.

En effet, ce référentiel est commun à Lambert II pour les points de la côte à l'Ouest, et les points de la frontière en Lambert I à l'Est. Ce qui évite de passer par le référentiel de RGF 93 (Ellipsoïde Mondial) qui, pour l'usage que l'on veut en faire, est plus éloigné d'environ 50 m du géoïde que l'ellipsoïde de Clarke NTF, lequel est tangent à l'origine, le Panthéon, je crois.

Ensuite, il est plus facile de travailler en coordonnées sphériques, d'autant que pour obtenir le résultat recherché il est nécessaire de connaître la différence de longitude entre deux

points de même latitude et que ce calcul se fera sur la sphère tangente à ce parallèle, le calcul entre les deux bornes de la frontière, qui sont données comme très proches, pouvant largement se contenter, dans ces conditions, d'un calcul sphérique sans corrections ellipsoïdales.

En notant A et D les deux bornes entre lesquelles se fera l'intersection B avec le parallèle du point de la côte Ouest, puis C le pôle terrestre, en notant comme d'habitude les angles dièdres par des lettres majuscules A, B et C, et les grands arcs sur la sphère par des lettres minuscules a, b et c on a :

$$\sin(B) = \frac{\sin(b) \cdot \sin(A)}{\sin(a)} = \frac{\cos(\varphi_A) \cdot \sin(Az_{AD})}{\cos(\varphi_B)}$$

où b est la colatitude de la borne A, où a est la colatitude de B, point inconnu situé à la même latitude que le point de la côte Ouest, où $A = Az_{AD}$ est l'azimut de l'arc AD calculable en partant des coordonnées géographiques de A et D par la formule de la géodésie dite directe, ou son équivalent sphérique ci-dessous :

$$\operatorname{tg}(Az_{AD}) = \frac{\operatorname{tg}(\varphi_D) \cdot \cos(\varphi_A) - \sin(\varphi_A) \cdot \cos(\Delta\lambda)}{\sin(\Delta\lambda)} = \hat{A}$$

avec $\varphi_A = \frac{\pi}{2} - a$, λ_A , longitude de A, $\varphi_B = \frac{\pi}{2} - a$, λ_A ,

latitude et longitude de D et $\Delta\lambda = \lambda_D - \lambda_A = \widehat{ACD}$.

Symétriquement on aurait avec les mêmes notations :

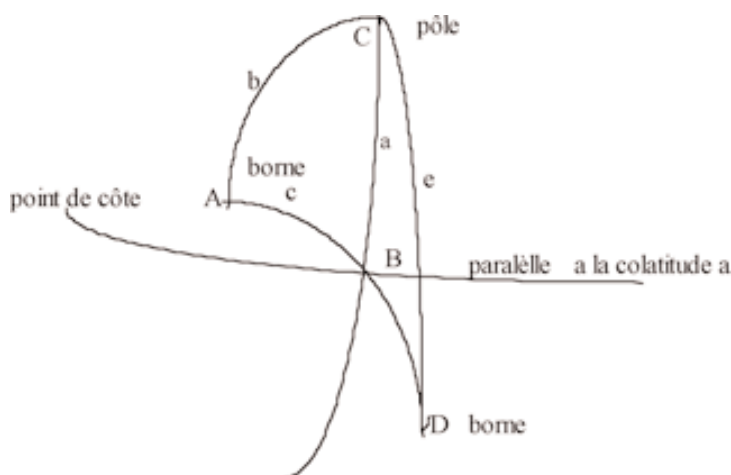
$$\operatorname{tg}(Az_{DA}) = \frac{\operatorname{tg}(\varphi_A) \cdot \cos(\varphi_D) - \sin(\varphi_D) \cdot \cos(\Delta\lambda)}{\sin(\Delta\lambda)} = \hat{D}$$

On aurait aussi :

$$\cos(\widehat{Arc AD}) = \sin(\varphi_A) \cdot \sin(\varphi_B) + \cos(\varphi_A) \cdot \cos(\varphi_B) \cdot \cos(\Delta\lambda)$$

On a ensuite la quatrième relation de Neper :

$$\operatorname{tg}\left(\frac{C}{2}\right) = \frac{\sin \frac{a-b}{2}}{\operatorname{tg} \frac{A-B}{2} \cdot \sin \frac{a+b}{2}}$$



■■■ où C est la différence de longitude $\Delta\lambda_{AB}$ recherchée entre A et B. Certains angles étant très petits on aura :

$$A\hat{C}B = \Delta\lambda_{AB} = \frac{a-b}{tg \frac{A-B}{2} \cdot \sin \frac{a+b}{2}} = \frac{\varphi_B - \varphi_A}{tg \frac{Az_{AD} - B}{2} \cdot \sin \frac{\varphi_B + \varphi_A}{2}}$$

Notons que ce calcul peut se faire aussi à partir de D au lieu de A ce qui fait un contrôle. En revanche, la méthode de dichotomie décrite fonctionne très bien, même, et surtout, en coordonnées sphériques. On divise un arc en deux parties en utilisant la somme vectorielle de \vec{A} et \vec{D} unitaires donnant le vecteur milieu M de l'arc, qu'on normalise ensuite, jusqu'à convergence de φ_M vers φ_B .

$$\vec{M} = \frac{\vec{A} + \vec{D}}{\|\vec{A} + \vec{D}\|} \quad \text{avec} \quad \vec{P} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_P) \cdot \cos(\lambda_P) \\ \cos(\varphi_P) \cdot \sin(\lambda_P) \\ \sin(\varphi_P) \end{pmatrix}$$

en découpant l'intervalle, de plus en plus petit, dans lequel se trouve le point de latitude jusqu'à retrouver la valeur recherchée, on parvient au résultat, à savoir sa longitude.

Enfin, précisons que le calcul de la grande normale N, qui précède le développement du parallèle, doit se faire, dans ce cas précis, avec les données de Clarke NT F pour le grand axe a et l'excentricité e. En outre, la longueur du parallèle, qui est une courbe sur la sphère, est plus grande que la distance géodésique entre le point de côte et la frontière de l'Est. Cette distance géodésique, assimilable pour le profane à une droite, est calculable aisément avec mon programme fokimi, c'est le problème dit "inverse" de la géodésie traditionnelle, il existait, bien avant, une méthode de calcul encore plus traditionnelle bien connue de tous. ●

RÉPONSE

de Bizouard Guillaume, Dramé Kadidia et Vuillemeys Alban auteur de l'article *A propos de N48°26'58" : le plus long parallèle de France*

Monsieur Million,

Votre méthode est intéressante et paraît plus simple que celles que nous avons employées. Mais notre démarche a été guidée par de nombreux éléments.

Tout d'abord nous voulions éviter les nombreuses transformations de coordonnées afin de ne pas entacher d'erreurs supplémentaires nos résultats finaux. On remarquera que lors du calcul par dichotomie, il n'y a qu'une seule transformation (Lambert zone → RGF 93), les résultats devant être fournis en RGF 93 (demande expresse de l'OGE), actuel cadre de référence des travaux topographiques d'envergure. Le calcul par Intersection nécessite par contre plus de transformations, mais cette méthode avait pour but de valider les résultats de la première, par une méthode un peu plus "originale".

Par ailleurs, nous ne l'avions pas précisé dans l'article mais nous devions fournir une distance réduite à l'ellipsoïde GRS 80, employée dans la définition du RGF 93. Or votre méthode permet de calculer la distance réduite à l'ellipsoïde de Clarke 1880 IGN qui, il est vrai, se rapproche le plus du géoïde, mais qui ne satisfait pas à l'exigence initiale de l'OGE. Et pour finir, nous avons voulu employer, par choix, des méthodes rigoureuses qui ne faisaient pas intervenir d'approximations telle l'assimilation de l'ellipsoïde à une sphère. ●

Tribune libre

Faut-il mettre du GPS partout ?

■ Bernard BEAUZAMY

Depuis l'avènement du GPS dans les années 70, sur impulsion du Ministère américain de la Défense, les applications du positionnement par satellite n'ont pas cessé de se répandre. Elles sont passées avec profit du militaire au civil et ont réellement conquis le grand public : les appareils de navigation, actuellement, ne coûtent que quelques centaines d'Euros. Tout taxi bien né est doté d'un GPS. Une flotte de camions convenablement équipés fait connaître sa position en temps réel. Il n'est plus permis d'avoir une crise cardiaque tranquillement. La mode est

à l'information, partout, tout le temps et en temps réel, bien sûr.

Bien des ouvrages d'art (ponts, digues, etc.) sont mis en place exacte grâce au GPS ; de même, des chaussées sont nivelées, des champs ensemencés, etc. Il me semble cependant que le principe même de la navigation par satellite est inutile, et même malsain, dans un certain nombre de situations.

Le satellite a ceci de plaisant qu'il couvre une très large zone ; sous réserve de disposer d'un nombre suffisant de satellites et de voir ceux-ci sous des angles convenables, on pourra

donc se repérer dans des zones dépourvues d'infrastructures : c'est cette application que visait initialement le Department of Defense aux USA.

Mais dans des zones étroites et pourvues d'infrastructures, le recours au positionnement par satellite n'apparaît généralement pas légitime. La mode actuelle, surtout depuis que le lancement de Galiléo – concurrent européen du GPS – a été décidé, interdit ce genre de réflexion, jugée politiquement incorrecte. Des projets de recherche visent à trouver des utilisations nouvelles à Galiléo : on lance, pour quelques milliards d'Euros, un sys-

tème sophistiqué, et ensuite on propose aux gens "si vous nous expliquez à quoi il peut servir, nous vous donnerons de l'argent". La position que nous défendons ici s'apparente donc à une provocation.

La première réticence à l'utilisation du GPS provient évidemment de l'aviation civile, qui estime que les instruments de positionnement usuels sont suffisants en général (ILS) ; vieux débat dans lequel nous n'entrerons pas ici. Mais ces réticences s'insèrent bien dans notre commentaire, parce qu'un aéroport est par essence une structure fixe (du moins ceux des pays civilisés) sur laquelle l'installation d'un équipement spécifique est possible.

Le même raisonnement s'étend au cas d'une zone urbaine dense, comme le sont nos villes européennes. Là encore, nous sommes en présence de constructions fixes, parfaitement accessibles, sur lesquelles il est possible d'installer tous les équipements que l'on souhaite. De plus, l'utilisation du GPS traditionnel en ville pose de sérieux problèmes, précisément parce que nous sommes en limite des conditions d'exploitation usuelles : précision insuffisante, multitrajets (rebonds sur des immeubles) et atténuation du signal. Dans certains cas, l'utilisation devient presque impossible : parkings couverts, tunnels, etc. Observons qu'en ville, le problème du positionnement n'est pas le même qu'en rase campagne. En zone libre, on souhaite savoir où l'on est par rapport à un référentiel lié à la Terre. Mais ce n'est plus du tout le cas si l'on est en ville : on souhaite simplement savoir dans quelle rue l'on se trouve. Il s'agit simplement de se repérer sur un plan de la ville, qui fera à tout le mieux 50 km dans chaque direction. L'échelle n'est plus du tout la même. Là où l'utilisation du GPS confine au sublime, ou au ridicule, comme on voudra, c'est à l'intérieur d'une enceinte, par exemple à l'intérieur d'un appartement. Les points que nous soulevions plus haut sont poussés à leur paroxysme. Tout d'abord, le signal GPS est très faible, voire inexistant. Ensuite, la précision est très dégradée : elle pourra être plusieurs fois supérieure aux limites de la pièce (si bien que l'on ne sait absolument pas où l'on se trouve). Enfin, le positionnement

absolu est totalement dépourvu de sens, parce que l'on cherche simplement à se placer par rapport aux murs. Le positionnement d'un mobile, un robot nettoyeur par exemple, à l'intérieur d'un appartement ou d'une enceinte, correspond à un réel besoin économique. Des robots aspirateurs existent déjà aux USA (mais ils fonctionnent selon un principe différent). L'utilisation chez les particuliers pose évidemment des problèmes du fait de l'encombrement, mais le nettoyage automatique d'un parking souterrain ou d'une galerie commerciale sont des applications tout à fait envisageables, pourvu que la question du positionnement soit convenablement résolue.

La volonté affichée d'utiliser partout le positionnement par satellite conduit donc, comme d'habitude avec la pensée politique, à des erreurs de raisonnement : on fait faire au satellite des choses pour lesquelles il n'est pas fait. On le sort de son "domaine de validité", si l'on ose dire. Et en même temps on s'interdit de réfléchir à des solutions concurrentes, moins coûteuses, plus précises.

Nous avons rencontré, disons-le par parenthèse, ce même problème lorsque nous avons étudié l'utilisation des systèmes d'observation par satellite. On cherche à observer n'importe quoi par satellite : un incendie, un glissement de terrain, un bateau non autorisé, un déplacement de troupes, etc. Mais dans nombre de cas le satellite ne voit rien, soit parce qu'il est trop haut (cas en particulier des satellites géostationnaires), soit parce qu'il passe trop vite (cas d'un satellite en orbite basse). Si on veut observer des navires dans la Manche, rien ne vaut une bonne paire de jumelles. Evidemment, cela fait moins "high tech" qu'un satellite bardé de toutes sortes de détecteurs, dans différentes bandes optiques.

Revenons donc à notre positionnement local, urbain, et même interne. Qu'est-ce qui remplacera la paire de jumelles ? Tout simplement un ensemble d'émetteurs fixés sur les murs, ce qu'on appelle parfois des "pseudolites" (pseudo-satellites). Le principe de base est le même que celui de la navigation par satellite, sauf que dans le cas présent les émetteurs sont fixes, ce qui

lève toutes les incertitudes relatives à l'orbite. Il est plus facile de savoir où est un émetteur fixé à un mur qu'un satellite en orbite autour de la Terre. De plus, si l'émetteur tombe en panne, on peut le réparer facilement. Le signal peut être de force satisfaisante : il suffit de mettre les émetteurs correspondants. La précision sera donc bonne.

Technologiquement parlant, il n'y a pas d'incompatibilité entre les deux systèmes : on peut imaginer un récepteur qui se guide sur les satellites lorsque ceux-ci sont utiles et qui "basculer" automatiquement sur les pseudolites lorsque ceux-ci sont disponibles (leur signal étant incomparablement plus fort que celui des satellites, la confusion n'est pas possible). On peut ainsi imaginer que le guidage se fasse sans discontinuité si l'on pénètre dans un parking ; il s'agit à la vérité d'une situation sans grand intérêt pratique.

Les émetteurs fixes seront utiles pour les applications commerciales que nous avons mentionnées tout à l'heure : nettoyage principalement. Le très faible coût des émetteurs fixes devrait permettre une industrialisation facile et rapide : si l'on regarde les problèmes techniques qui se posent, par exemple la synchronisation, ils sont infiniment moins ardues que ceux que pose le GPS. On pourrait donc imaginer une solution industrielle du type suivant : le "produit" consiste en un ensemble d'émetteurs à fixer aux murs, plus un dispositif de repérage par rapport à ces émetteurs (dispositif qui sera fixé sur le robot mobile).

Pourquoi donc cette solution n'est-elle jamais considérée ? Tout simplement à cause de l'hégémonie idéologique que détient le GPS : rien de bien ne se fait sans satellite. Le principe des émetteurs fixes a déjà été considéré, bien sûr, mais uniquement comme appoint aux satellites : on mettrait un pylône à proximité de la piste d'atterrissage, pour aider le signal GPS s'il est insuffisant. Tandis que ce que nous décrivons ici est un système de positionnement, basé sur le même principe, mais entièrement dépourvu de satellites. ●

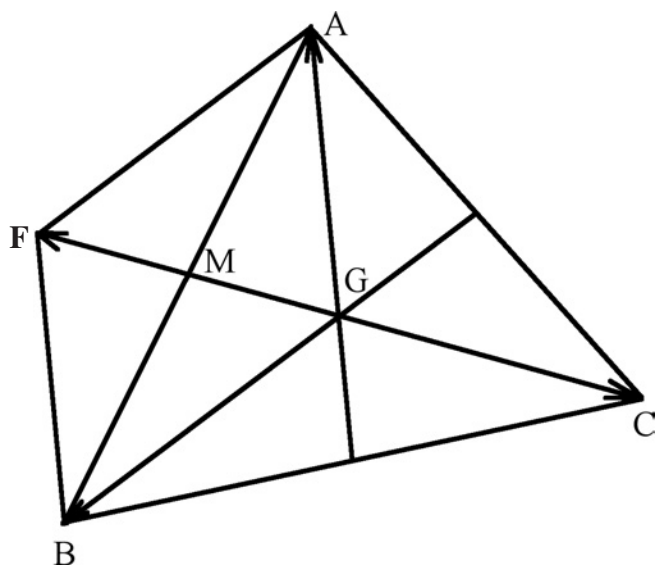
Contact

Bernard BEAUZAMY

PDG, Société de Calcul Mathématique SA

■ par Raymond D'HOLLANDER

Solution de la récréation géométrique du n°106 de XYZ



1 - Construisons sur GA et GB le parallélogramme GAFB

tel que \vec{GF} soit la somme des deux vecteurs \vec{GA} et \vec{GB} .

Soit M le milieu de AB qui est aussi celui de GF. On sait que le centre de gravité G du triangle ABC est tel que :

$$MG = \frac{CM}{3} \text{ et que } CG = \frac{2 CM}{3}.$$

$$\text{On a donc } FG = 2 MG = \frac{2 CM}{3}$$

Il en résulte que FG et CG sont égaux. Le vecteur

$$\vec{GC} = -\vec{GF}$$

$$\text{Comme } \vec{GF} = \vec{GA} + \vec{GB}$$

il en résulte que :

$$\vec{GA} + \vec{GB} + \vec{GC} = 0 \text{ c.q.f.d.}$$

2 - Effectuons le carré scalaire $(\vec{GA} + \vec{GB} + \vec{GC})^2$; il vient

$$(1) (\vec{GA} + \vec{GB} + \vec{GC})^2 = \vec{GA}^2 + \vec{GB}^2 + \vec{GC}^2 + 2(\vec{GA} \cdot \vec{GB} + \vec{GB} \cdot \vec{GC} + \vec{GC} \cdot \vec{GA}) = 0$$

Par ailleurs dans le triangle BGC on a :

$$\begin{aligned} a^2 &= \vec{GB}^2 + \vec{GC}^2 - 2 \vec{GB} \cdot \vec{GC} \\ b^2 &= \vec{GC}^2 + \vec{GA}^2 - 2 \vec{GC} \cdot \vec{GA} \\ c^2 &= \vec{GA}^2 + \vec{GB}^2 - 2 \vec{GA} \cdot \vec{GB} \end{aligned}$$

En additionnant : $a^2 + b^2 + c^2 = 2(\vec{GA}^2 + \vec{GB}^2 + \vec{GC}^2) - 2(\vec{GA} \cdot \vec{GB} + \vec{GB} \cdot \vec{GC} + \vec{GC} \cdot \vec{GA})$

D'où (2) : $2(\vec{GA} \cdot \vec{GB} + \vec{GB} \cdot \vec{GC} + \vec{GC} \cdot \vec{GA}) = 2(\vec{GA}^2 + \vec{GB}^2 + \vec{GC}^2) - (a^2 + b^2 + c^2)$

En remplaçant dans la relation (1) $2(\vec{GA} \cdot \vec{GB} + \vec{GB} \cdot \vec{GC} + \vec{GC} \cdot \vec{GA})$ par sa valeur tirée de (2)

il vient (3) $\vec{GA}^2 + \vec{GB}^2 + \vec{GC}^2 + 2(\vec{GA}^2 + \vec{GB}^2 + \vec{GC}^2) - (a^2 + b^2 + c^2) = 0$

Or le carré scalaire d'un vecteur est égal au carré de son module. On a donc, $\vec{GA}^2 = \overline{GA}^2$ etc.

(4) $3(\overline{GA}^2 + \overline{GB}^2 + \overline{GC}^2) = a^2 + b^2 + c^2$ d'où :

(5) $\overline{GA}^2 + \overline{GB}^2 + \overline{GC}^2 = \frac{a^2 + b^2 + c^2}{3}$ c.q.f.d.