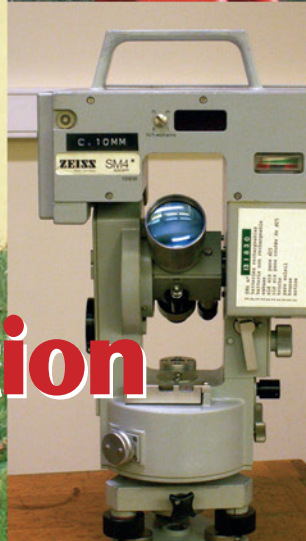
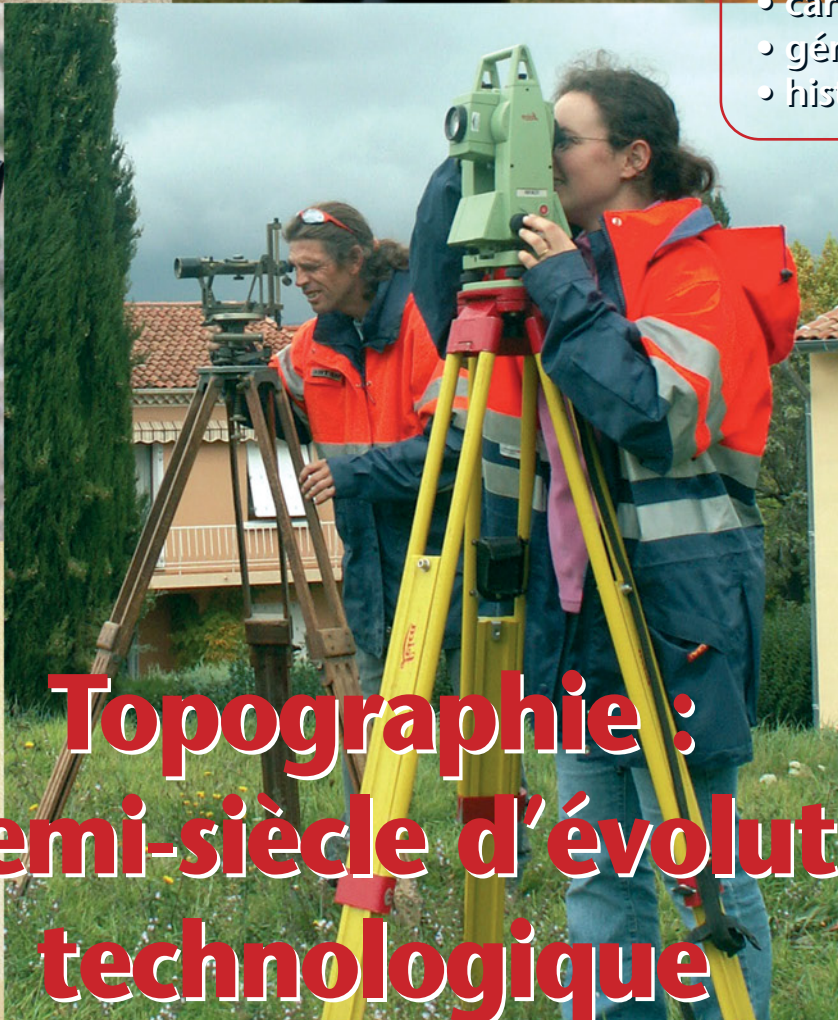


xvz

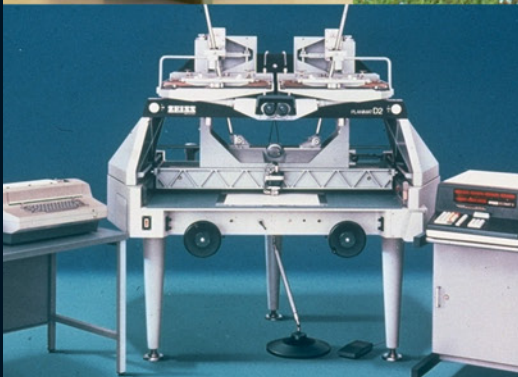
Éditée par l'
Association
Française de
Topographie
n°110



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



Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique



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: du lundi au jeudi de 9h30
à 16h30 et le vendredi de 9h30 à 13h

Rédacteur en chef

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

Comité de Rédaction

Stéphane Durand
Enseignant-Chercheur - ESGT Le Mans
Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg

Michel Kasser
Directeur ENSG - Marne-la-Vallée

Tania Landes
Maître de Conférences
INSA de Strasbourg

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

Chantal Holdrinet
aft78@wanadoo.fr
Tél.: 0139539893

À PARTIR DE JANVIER 2007

Samuel Guillemin
Tél.: 06 72 12 08 97
communication@aftopo.org

Conception et maquette

Dorothée Picard

Abonnements: Evelyne Chevalier

Autre publication: L'annuaire de l'AFT

IMPRIMERIE MODERNE USHA

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

Dépôt légal

1^{er} trimestre 2007 ISSN 0290-9057
N° CPPAP: 01 11 G 80 866

Tirage de ce numéro: 1600 ex

Abonnement annuel

France CEE: 83 €
Etranger (avion, frais compris): 86 €
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.73
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.

Mars 2007 • 1^{er} 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..... 7

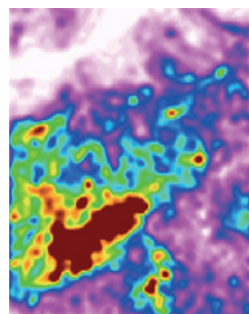
■ Techniques nouvelles

> Nouvelles technologies: quelles
(r)évolutions pour la topographie?
Tania LANDES - Jacques LEDIG 11

■ Histoire

> La mesure des bases de la méridienne
de France (1792 - 1798)
La base de Perpignan
Patrick VALETTE 16

■ SIG



> Evaluation de différentes méthodes
d'interpolation spatiale pour la production
d'un MNT à partir de données
topographiques dans un SIG
Noamen REBAI, Tarek SLAMA
et Mohamed Moncef TURKI 19

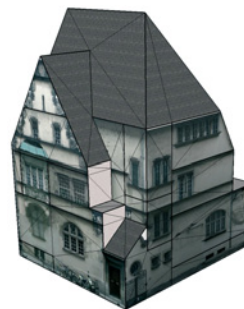
■ Topographie: un demi-siècle d'évolution technologique (1/4)

> En guise d'introduction
> Etat des lieux en 1960



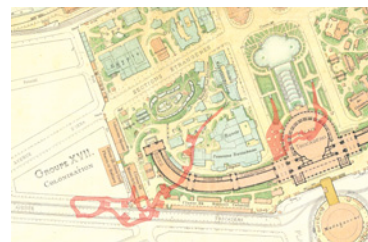
> La première révolution: la mesure
électronique des distances
Paul COURBON 29

■ Photogrammétrie



> Gestion d'ouvrage architectural: de la saisie
photogrammétrique à l'interface 3D d'accès
aux données patrimoniales
Emmanuel ALBY - Elise MEYER - Pierre
GRUSSENMEYER - Mauro RAMPAZZO 45

■ Cartographie



> Sur les plans de Paris:
des portes ouvertes sur l'en-deçà du sol
Gilles THOMAS 54

■ Topo vécue

> Les à-côtés de la topographie
(Grandeur et servitudes de la profession)
Robert CHEVALIER 65

■ Art et Géométrie

> Roland Goeschl: bleu, jaune, rouge et du noir
Jean-Pierre MAILLARD 68

■ Livres 70

■ GSF

> La saison des pluies (été) et
la saison pluvieuse (hiver)...
François BODIN 72

Pour la recherche de nos annonceurs
consulter la page 71.

DANS LE PROCHAIN NUMÉRO D'XYZ - 111:
Les résultats du prix de l'AFT 2006

Devoir de mémoire

Paul Courbon est infatigable. Après une carrière professionnelle bien remplie au service de la topographie, il trouve l'énergie de courir le monde, de vivre sa curiosité sans limite des techniques et de la compréhension de la géographie. Mieux, il réussit à ménager un temps pour l'écrit, la meilleure façon de garder la trace de ses acquits.

Dans son dernier article XYZ (n° 106), Paul Courbon nous a fait gravir à sa suite, un à un, tous les sommets culminants de chaque département.

Cette fois, c'est à une autre performance qu'il se livre.

Comme annoncé, XYZ a le plaisir de publier, en quatre parties, son essai "Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique".

Dans son introduction (cf. page 30), il exprime son impérieux besoin de rappeler combien en cinquante ans l'explosion technologique en matière de topographie a été considérable.

Tant que des acteurs de la mutation sont encore en mesure d'en porter directement témoignage il a tenu, avec eux, à dater les progrès des matériels et des méthodes. Il a trouvé une motivation supplémentaire à faire face à la disparition de la mémoire avec celles des constructeurs, des technico-commerciaux, des utilisateurs et des formateurs qui ont accompagné les changements depuis le début. Une course contre le temps vaut bien celles vers les sommets enneigés ou non !

Sa recherche a été compliquée par les regroupements de société tels Géotronics et Zeiss absorbés par Trimble et aussi Kern et Wild qui ont connu un même sort. Les restructurations inhérentes à la concentration des entreprises – il paraît qu'en avoir seulement trois ou quatre favorise la concurrence – ont aussi constitué des difficultés. Le résultat est d'autant plus méritoire. Dans ces conditions, il est d'ores et déjà réceptif à toutes les observations et les compléments que pourra susciter la lecture de son essai.

Paul Courbon s'est donc employé, en quelque sorte, à un devoir de mémoire qui fait suite aux travaux de ses remarquables prédécesseurs dans d'autres domaines couverts par l'AFT, Jean-Jacques Levallois et Raymond D'Hollander. Cher aux historiens, ce devoir de mémoire envers ceux qui laissent des traces dans l'Histoire, qu'ils soient acteurs ou victimes, à sa façon, l'auteur propose de le transposer à l'Histoire des sciences et des techniques en n'hésitant pas à montrer la voie.

Qu'il soit remercié pour cette entreprise.

Jean-Pierre Maillard

■ par Raymond D'HOLLANDER

Soit ABC un triangle sphérique dont les angles ont pour valeurs A, B, C et où les côtés sont $a = \widehat{BC}$, $b = \widehat{CA}$, $c = \widehat{AB}$. On pose $2p = a + b + c$ et on désigne par ε l'excès sphérique du triangle sphérique ABC.

1 - Démontrer que $\tan \frac{x-y}{2} = \frac{\sin x - \sin y}{\cos x - \cos y}$

2 - En posant $x = \frac{A+B}{2}$ $y = \frac{\pi-C}{2}$ montrer que

$$\tan \frac{A+B+C-\pi}{4} = \frac{\sin \frac{A+B}{2} - \cos \frac{C}{2}}{\cos \frac{A+B}{2} + \sin \frac{C}{2}}$$

3 - En utilisant les formules de trigonométrie sphérique de Delambre que l'on rappelle :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \frac{A+B}{2} = \frac{\cos \frac{a-b}{2}}{\cos \frac{c}{2}} \cos \frac{C}{2} \\ \cos \frac{A+B}{2} = \frac{\cos \frac{a+b}{2}}{\cos \frac{c}{2}} \sin \frac{C}{2} \end{array} \right.$$

ainsi que la 3^e formule de Borda : $\cot \frac{C}{2} = \sqrt{\frac{\sin p \sin(p-c)}{\sin(p-a)\sin(p-b)}}$

démontrer la formule de Simon L'Huilier : $\tan \frac{\varepsilon}{4} = \sqrt{\tan \frac{p}{2} \tan \frac{p-a}{2} \tan \frac{p-b}{2} \tan \frac{p-c}{2}}$

4 - On suppose qu'on a affaire à un triangle sphérique dont les longueurs des côtés a b c sont de l'ordre de grandeur de ceux d'un triangle géodésique de 1^{er} ordre

$a \approx b \approx c \approx 32 \text{ km}$, $R = 6400 \text{ km}$ est le rayon de la sphère ;

$\frac{a}{R} \approx \frac{b}{R} \approx \frac{c}{R} \approx \frac{1}{200}$, quantité que l'on supposera du premier ordre de petitesse.

Montrer que dans ce cas ε a pour partie principale :

$\varepsilon = \frac{1}{R^2} \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$ et qu'il s'agit d'une quantité du second ordre de petitesse.

5 - En désignant par T' l'aire du triangle plan ayant pour longueur des côtés exprimés en km : a b c, montrer que la partie principale de ε est donnée par

$\varepsilon = \frac{T'}{R^2}$ (théorème de Legendre).

6 - Application numérique $a = b = c = 31,830 \text{ km}$ $R = 6366 \text{ km}$

Calculer en décimilligons l'excès sphérique de ce triangle.

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

1 - La projection stéréographique étant conforme on a $A' = A$

$$\widehat{A'B'T} = B, \quad \widehat{A'C'T} = C$$

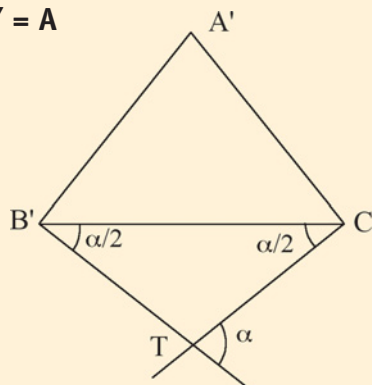
$$\widehat{A'B'T} = B' + \frac{\alpha}{2} \quad \text{d'où} \quad B' = B - \frac{\alpha}{2}$$

$$\widehat{A'C'T} = C' + \frac{\alpha}{2} \quad \text{d'où} \quad C' = C - \frac{\alpha}{2}$$

$$A' + B' + C' = A + B + C - \alpha$$

$$\text{Or } A' + B' + C' = \pi, \text{ d'où : } A + B + C - \pi = \alpha$$

L'excès sphérique du triangle ABC est α



2 - Il est clair que $b' = A'S \tan \frac{b}{2}$, $c' = A'S \tan \frac{c}{2}$. Comme $A'S = 1$, on a : $b' = \tan \frac{b}{2}$ $c' = \tan \frac{c}{2}$

En raison des propriétés d'inversion liées à la projection stéréographique on a :

$$SB \cdot CB' = SC \cdot SC' = SA \cdot SA' = 2$$

Il en résulte la similitude des triangles SBC et SC'B' et la relation :

$$\frac{C'B'}{BC} = \frac{SC'}{SB} \quad \text{d'où} \quad C'B' = a' = \frac{BC \times SC'}{SB} \quad (1)$$

Considérons le triangle de l'espace A'BC. L'arc BC a pour centre A' et pour rayon A'B = A'C égal à l'unité. Il en résulte que si on considère la hauteur AH du triangle A'BC, l'angle $\widehat{HA'C} = \frac{a}{2}$

$$BC = 2HC = 2 \sin \frac{a}{2}, \quad SC' = \frac{1}{\cos \frac{b}{2}}, \quad SB = 2 \cos \frac{c}{2} \quad (\text{le triangle SAB est rectangle en B})$$

En remplaçant ces longueurs par leurs valeurs dans (1) il vient :

$$a' = \frac{\sin \frac{a}{2}}{\cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2}}$$

3 - Dans le triangle A'B'C', on a la relation :

$$a'^2 = b'^2 + c'^2 - 2b'c' \cos A'$$

Remplaçons y : $a' b' c' A'$ par leurs valeurs.

$$\text{On obtient} \quad \frac{\sin^2 \frac{a}{2}}{\cos^2 \frac{b}{2} \cos^2 \frac{c}{2}} = \tan^2 \frac{b}{2} + \tan^2 \frac{c}{2} - 2 \tan \frac{b}{2} \tan \frac{c}{2} \cos A$$

En multipliant les 2 membres par $\cos^2 \frac{b}{2} \cos^2 \frac{c}{2}$ on obtient :

$$\sin^2 \frac{a}{2} = \sin^2 \frac{b}{2} \cos^2 \frac{c}{2} + \sin^2 \frac{c}{2} \cos^2 \frac{b}{2} - 2 \sin \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2} \sin \frac{c}{2} \cos \frac{b}{2} \cos A, \text{ soit :}$$

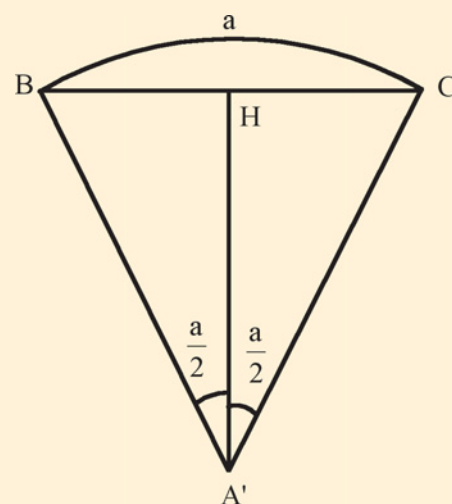
$$\frac{1 - \cos a}{2} = \frac{1 - \cos b}{2} \cdot \frac{1 + \cos c}{2} + \frac{1 - \cos c}{2} \cdot \frac{1 + \cos b}{2} - \frac{1}{2} \sin b \sin c \cos A$$

4 - En multipliant les deux membres par 2, on a :

$$1 - \cos a = \frac{1}{2}(1 + \cos c - \cos b - \cos b \cos c) + \frac{1}{2}(1 + \cos b - \cos c - \cos b \cos c) - \sin b \sin c \cos A$$

En simplifiant : $-\cos a = -\cos b \cos c - \sin b \sin c \cos A$, ou : $\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$

C.Q.F.D.



Nouvelles technologies: quelles (r)évolutions pour la topographie?

■ Tania LANDES - Jacques LEDIG

Cette question, avec toutes les interrogations, ambiguïtés, réticences et craintes qu'elle suscite n'a pas empêché la Tribune des Spécialistes de l'aborder avec enthousiasme lors des Journées de la Topographie 2006 organisées à l'INSA de Strasbourg.

Ce sujet a fait l'objet de la page de couverture de la plaquette présentée ci-dessous. Les lecteurs auront constaté qu'elle a été élaborée à partir de l'œuvre d'Eugène Delacroix (1798 - 1863) intitulée "La liberté guidant le peuple" et ancré dans nos esprits comme grand symbole de la révolution. Ce motif soulevait non seulement la question de la révolution des matériels, des modes de saisies (passage à l'ère du numérique), mais aussi de l'évolution du métier de géomètre.

En invitant à sa table des spécialistes de divers horizons, la Tribune a retracé dans un premier temps les évolutions majeures de ces dix dernières années.



Plaquette des journées de la topographie 2006.

Dans un second temps, elle a suscité un échange d'idées visionnaires en tentant de nous projeter dans le futur. A quelles évolutions avons-nous participé dans le monde de la topographie? Que nous prépare l'avenir? Comment les nouvelles technologies peuvent-elles évoluer encore? La topographie prend-elle un nouveau visage? Tant de questions auxquelles des éléments de réponse ont été apportés.

Avant d'ouvrir le débat, Jacques Ledig, animateur de cette Tribune a mis en exergue la nécessité de définir les termes "évolution" et "révolution" dans un contexte plus général. En s'aidant du dictionnaire, il a souligné le caractère équivoque de ces termes, employés fréquemment dans des contextes diversifiés comme l'illustrent les paragraphes suivants.

Evolution

L'évolution peut se décliner de deux façons: l'évolution dans le sens de la "transformation" et l'évolution dans le sens du "mouvement".

1. Evolution dans le sens de la "transformation":

- Transformation graduelle et continue: notion de constance, de persévérance "linéaire"
- Succession des phases d'un phénomène donné: encore la constance tranquille et la notion de continuité
- Ensemble des changements subis au cours du temps et ayant pour résultat l'apparition de formes nouvelles, de concepts: on est exactement dans le vif du sujet!

2. Evolution dans un sens de "mouvement":

- Mouvement ou ensemble de mouvements divers et coordonnés
- Mouvements ordonnés exécutés par une troupe, des véhicules, les navires, des avions dans une formation précise fixée à l'avance

Cette notion de mouvement est d'ailleurs pleinement reprise dans la

définition du mot "Révolution" qu'il convient de définir à présent.

Révolution

La révolution, quant à elle, peut se décliner en un sens de "rotation" et en un sens de "changement brusque".

3. Révolution dans le sens de la "rotation":

- Astronomie: mouvement orbital périodique d'un corps céleste
- Géométrie: Mouvement périodique d'un objet autour d'un axe ou d'un point central

4. Révolution dans le sens de "changement brusque":

- Changement brusque et violent dans la structure politique et sociale d'un état donné (causé par un groupe qui se révolte contre l'autorité et prend le pouvoir); cet aspect ne nous concerne pas vraiment
- Changement brusque, d'ordre économique, moral et culturel qui se produit dans une société. C'est un bouleversement profond des valeurs fondamentales d'une société; par cet aspect, nous ne sommes plus dans le sujet!

Tandis que l'Evolution dans un sens du mouvement traduisait une certaine harmonie, la révolution dans le sens de changement brusque traduit davantage une brutalité certaine!

Le mot révolution ressemble aussi à un assemblage, une concaténation des mots "rêves" et "évolution", ce qui n'est pas nécessairement péjoratif ou inquiétant, bien au contraire.

Comme le reflèteront les interventions suivantes, l'évolution de la profession de géomètre-topographe est un tout: il y a d'une part le matériel et les modes de saisie, bien sûr; d'autre part il y a la formation, l'organisation des structures professionnelles comme celles industrielles et commerciales, des constructeurs de matériels, mais également la législation, l'organisation administrative française et européenne évidemment,

■ ■ ■ sans oublier l'inévitable phénomène de mondialisation auquel aucun d'entre nous n'a vocation à se soustraire. Une fois le contexte exposé, la parole est donnée aux différents intervenants : Alain Gaudet, pour évoquer l'évolution de la profession de Géomètre Expert ; Pierre Grussenmeyer pour aborder l'évolution de la formation d'ingénieur topographe ; M. Bertrand Chazaly pour rappeler l'évolution des modes d'acquisition en topographie ; M. Farouk Kadded et M. Jean-François Cabanel pour aborder le point de vue des constructeurs ; et enfin, M. Delerba pour présenter les évolutions dans le domaine de la géodésie.

Evolution de la profession...

Monsieur Alain Gaudet, Président du Conseil Supérieur de l'Ordre des Géomètres Experts a plus particulièrement insisté sur l'évolution du métier de Géomètre Expert ces 20 dernières années. Etroitement liés à l'évolution des matériels, le métier et les habitudes de travail ont inéluctablement évolués. Si, il y a une vingtaine d'années encore un chef de brigade ne sortait pas sans 2 ou 3 coéquipiers, aujourd'hui, il peut effectuer ses levés de façon autonome, grâce à une instrumentation robotisée et très sophistiquée. En se basant sur le réseau de stations permanentes TERIA mis à disposition par l'OGE, il lui suffira d'investir dans une seule antenne GPS pour réaliser ses travaux de levés ou de mises en place de canevas.

Evolution de la formation...

On ne peut pas parler d'évolution du métier de géomètre sans évoquer l'évolution de la formation menant au diplôme d'ingénieur topographe. Ainsi, Pierre Grussenmeyer, enseignant en spécialité Topographie à l'INSA de Strasbourg a tout d'abord présenté les moments forts du développement de notre établissement. En 1875, alors "École d'hiver pour techniciens du Génie Rural", l'établissement accueille des stagiaires venant du cadastre et du Génie Rural et crée alors la section Géomètre en 1897 !



Cours de plein air pour les géomètres, années 1930.

Soixante neuf ans plus tard, l'école est baptisée École Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg (ENSAIS), avant de rejoindre en 2003 le réseau des INSA reconnu au niveau international.

En rejoignant ce réseau, et compte tenu de l'harmonisation de l'enseignement supérieur au niveau européen, le cursus a été adapté à une formation en 5 ans : 2 années de cycle préparatoire intégré à l'école (ou 2 années de classes préparatoires aux grandes écoles) à l'issue desquelles, les étudiants émettent un souhait de spécialité (topographie, génie civil, génie électrique, génie climatique et énergétique, génie mécanique, mécatronique ou plasturgie). Leur formation est jalonnée de périodes de stages en milieu professionnel (environ 38 semaines sur 5 ans). L'ouverture à l'internationale a aussi amené avec elle l'apprentissage obligatoire de deux langues étrangères, un stage de minimum 3 mois à l'étranger, la possibilité de préparer un double diplôme avec l'Université de Karlsruhe (spécifique à la spécialité topographie).

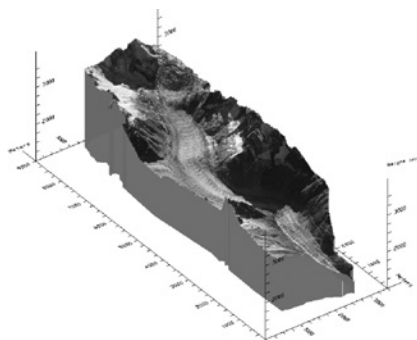
Avec un effectif nominal de 30 étudiants, les promotions de futurs ingénieurs topographes peuvent se targuer d'avoir profité d'un encadrement presque individuel et d'une formation solide. Aussi, malgré ses changements de noms au fil des années, l'école a su préserver une excellente image de marque et une formation reconnue de qualité en topographie.

Evidemment, l'évolution de la formation reflète celle de notre environnement socio économique et technologique. Ces évolutions ont fait naître dès les années 80 des modules d'enseignements tels que les SIG, la tachéométrie

électronique, la géodésie spatiale, la photogrammétrie. Aujourd'hui, des modules tels que les projets de terrain, les projets d'imagerie et modèles virtuels, projets de recherche technologique, permettent de plonger l'étudiant dans des situations concrètes de projets réels et de les ouvrir au monde de la recherche. L'ingénieur géomètre topographe de l'INSA de Strasbourg, tout en plongeant ses racines dans les fondements quasi immuables de nos savoir-faire, est devenu un professionnel de la géomatique. A noter que la formation a été affinée par l'introduction de cours de management des ressources humaines, de stratégie et gestion financière d'entreprise.

D'un point de vue organisationnel, les cours souvent magistraux dans les années 70 ont laissé plus de place en travaux dirigés, travaux pratiques, projets, enseignements assistés par ordinateurs et autres travaux personnels. Ces modes d'enseignement visent à développer et favoriser l'autonomie des étudiants.

Comme évoqué précédemment, la curiosité de l'ingénieur est également suscitée par sa confrontation à des problématiques de recherche. Dans ce contexte, l'équipe de recherche en topographie PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique) à l'INSA de Strasbourg a vu le jour en 1996. Elle est l'une des cinq équipes de l'UMR 694 MAP (Modélisation de l'Architecture et du Paysage), qui, en association avec le CNRS et le Ministère de la Culture et de la Communication, porte sa problématique sur l'élaboration de modèles et d'outils de simulation en architecture. Les projets de recherche auxquels participe l'équipe sont divers. On peut citer le projet MEGATOR (Mesure de l'Evolution des Glaciers Alpins par Télédétection Optique et Radar) dont l'objectif est de développer une méthodologie de traitement des données optiques et radar satellitaire haute résolution pour la surveillance des glaciers. Ce projet associe 4 laboratoires français : le LISTIC (Polytech'Savoie), GIPSA (INP Grenoble), MAP-PAGE (INSA de Strasbourg), LTCI (Télécom Paris) et a donné naissance à une collaboration avec le DLR (Deutsches Zentrum für



Modèle 3D du glacier de la Mer de Glace 3D-model: drapage d'orthophotos de 1995 sur un MNT réalisé par photogrammétrie.

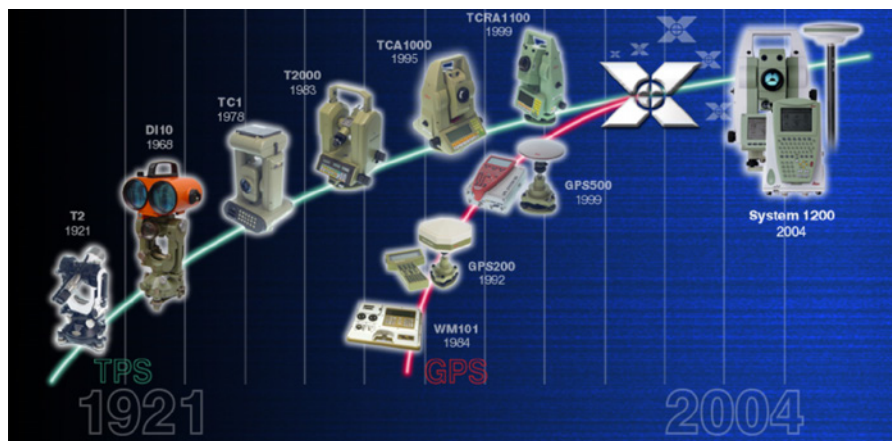
Luft und Raumfahrt). Ces recherches apportent leur contribution au suivi de la fonte des glaciers et à la compréhension du réchauffement climatique. D'autre part, plusieurs thèses sont en cours sur les thèmes de cartographie mobile, de détection automatique de bâtiments à partir de données Lidar aéroportées et terrestres, la modélisation tridimensionnelle de bâtiments comme interface pour un système d'information sur le Web, etc.

Pour plus d'informations sur la spécialité Topographie de l'INSA de Strasbourg, le lecteur pourra se reporter au site <http://www.insa-strasbourg.fr/topographie/>

Evolution des modes d'acquisitions en topographie

Un exemple d'évolution technologique a été décrit par B.Chazaly (ATM3D), prestataire de données lasergrammétriques terrestres. En comparant le levé lasergrammétrique aux techniques de levés plus conventionnelles, il en ressort une nouvelle approche du terrain ainsi qu'un nécessaire développement de notre culture technologique.

La donnée produite dans son état brut est un nuage de points 3D, obtenu après un scannage fin des points d'appui permettant de géoréférencer le nuage. Les lasers scanner 3D sont capables d'enregistrer plusieurs milliers de points en 3 dimensions en quelques minutes, avec une précision de positionnement de quelques millimètres sur une portée de 10 m à 500 m. Ils permettent en outre de collecter une information en intensité, caractéristique



Evolution des instruments Leica depuis 1921.

de la surface scannée. Ainsi, un très grand nombre d'informations peuvent être enregistrées très rapidement et à distance. L'ensemble des données ainsi obtenues constitue une réplique très fine de la réalité, sans pour autant constituer un modèle en tant que tel. Néanmoins, le résultat est époustouflant, si l'on pense que le genre de scan présenté dans la figure ci-dessous du tunnel Maurice Lemaire a permis d'acquérir 4.9 millions de points, au rythme de 400 m de tunnel par jour (scan seul). Le temps mis pour réaliser, avec une densité de points équivalente, un levé conventionnel de ce même chantier serait inimaginable et n'aurait d'ailleurs aucun sens !

Ainsi, la quantité de données à enregistrer est conséquente et le mode de levé que suscite une telle technique d'acquisition incite à approcher le terrain différemment. Les modes d'acquisitions ont non seulement subi une révolution, mais ont également obligé le topographe à révolutionner sa façon d'observer l'objet. De plus, le produit est rapidement déclinable, puisqu'il suffit de disposer d'un modèle 3D surfacique pour ensuite en extraire tous les produits dérivés souhaités. Ainsi, il permet



Tunnel Maurice Lemaire à Sainte Marie aux Mines.

une grande liberté d'exploitation pour le client, qui pourra extraire de ce nuage diverses informations (points caractéristiques, profils, coupes, extractions, mesures, etc.).

Si la technique lasergrammétrique est largement répandue aujourd'hui, il reste à développer une nouvelle culture technologique. En effet, trois points essentiels sont à adopter et mettre en œuvre : passer de la 2.5D à la 3D donc "penser en 3D", démocratiser les logiciels et démocratiser les matériels (capteurs, vision).

Point de vue de constructeurs...

M. Farouk Kadded, Responsable Produits France chez Leica Geosystems a présenté l'évolution remarquable des instruments topographiques depuis 1921 à nos jours en citant les instruments ayant jalonné ces décennies (du T2, en passant par le TCA 1000, jusqu'au GPS système 1200).

Qui aurait présagé que 25 ans après leur développement, les distancemètres équiperaient 90 % des théodolites ? de même, que 15 ans après la sortie du premier carnet électronique, 99 % des tachéomètres en disposent ? Le même phénomène s'est produit avec l'arrivée du premier tachéomètre robotisé en 1994 : 12 ans plus tard, 80 % des cabinets en sont équipés ! Aujourd'hui 80 % des tachéomètres sont capables de prendre des mesures sans prisme... bientôt 100 % des géomètres disposeront d'une antenne GPS et se raccorderont au réseau de stations permanentes. Ainsi, ce qui constituait une

■ ■ ■ révolution hier est un instrument incontournable et "banal" aujourd'hui. Les révolutions à adopter cette année ? la plus marquante sera fort probablement la mise en place et l'emploi des réseaux de stations permanentes (Orphéon, Teria, RGP, SatInfo). En conclusion, la technologie avançant tous les jours, elle changera nos méthodes de travail demain. Il nous faut anticiper. Ainsi, la veille technologique joue un rôle très important. De plus, l'intégration des nouvelles technologies par la profession est de plus en plus rapide (formations, intégrations au sein des structures, etc.). Enfin, le phénomène de démocratisation des technologies est inéluctable (Théodolite de chantier, niveau, GPS...). C'est pourquoi, le topographe doit garder son avance..., c'est une question de compétitivité... d'existence. Il faut prendre le temps de travailler mieux et avoir un regard positif sur ce qui est nouveau.

Jean-François Cabanel, représentant l'entreprise Trimble a notamment insisté sur les rapprochements stratégiques de compétences européennes, américaines et asiatiques. Les évolutions technologiques sont en effet le fruit du regroupement de plusieurs savoir-faire en provenance d'Europe pour les capteurs opto-électroniques type Stations Totales, niveaux numériques (Allemagne, Suède, France), et des USA pour le GPS.

Dans les années 1990, la notion de Topographie Intégrée fait parler d'elle. Ainsi, les avancées technologiques des Stations Totales Optiques se sont traduites par l'introduction du système "une seule personne" – commande de la station à distance – si bien que le système robotisé constituait alors un exemple parfait de regroupement de composants divers au sein d'une solution topographique intégrée. De plus, des technologies révolutionnaires (induction magnétique, le système de recherche du prisme et la compensation active en cas de vibrations, sans câble) sont venues améliorer de façon significative la productivité. En parallèle, une nouvelle ère de positionnement par satellites a vu le jour: depuis le premier GPS temps réel il y a 13 ans à aujourd'hui avec les récepteurs



Le GPS d'il y a 13 ans... à aujourd'hui !



GNSS "tout intégré" tout en bénéficiant de la modernisation de la constellation GPS (L2C, L5), de la compatibilité avec la constellation russe Glonass, en attendant les avancées de la constellation européenne Galileo.

On constate qu'en un laps de temps très bref, le géomètre a su tirer cinq types d'avantages fondamentaux des remarquables innovations de la technologie: le gain de productivité, le meilleur contrôle de la qualité des données, la précision plus élevée des données, la plus grande simplicité d'emploi des équipements et l'accroissement de la sécurité.

Les secteurs clés pour les technologies topographiques futures se situeront au niveau des communications, des systèmes de positionnement par satellites, des technologies Laser Scanner 3D, des systèmes inertiels, de l'intégration plus poussée des données des SIG.

Evolutions dans le domaine de la géodésie: "la révolution est proche !"

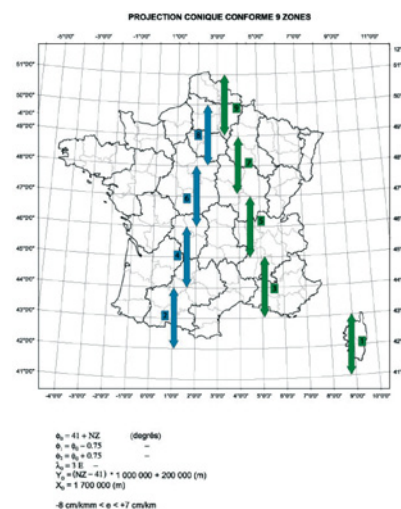
Enfin, M. Denis Delerba est intervenu à la Tribune en tant que responsable de la DIG de la Ville de Nice et Animateur national du Groupe de Travail SIG TOPO de l'AITF (Association des Ingénieurs Territoriaux de France).

En évoquant l'Expérience d'Ératosthène en 200 av. JC, M.Delerba a rappelé que dès l'antiquité, la terre est considérée sphérique. La méthode des Arcs a ainsi été utilisée jusqu'au XVII^e siècle. Dès le XVII^e siècle, la Géodésie moderne utilisant des techniques de triangulations et de nouveaux instruments a pris le relais dans l'objectif de mesure de la Terre.

En effectuant un grand saut de plusieurs siècles, on peut constater que les apports technologiques ont été nombreux. On peut citer: l'emploi du laser, la robotique, l'automatisation, les lectures numériques, le RGP, les réseaux temps réels, les télécommunications. Durant les années 2000, l'apport technologique a également été accompagné d'apports réglementaires: l'obligation de rattachement, le RGF93 / Lambert 93, les projections coniques conformes 9 zones, le contrôle obligatoire via les classes de précisions, la topographie incluse dans le SIG.

Il n'a pas manqué l'occasion de faire un petit rappel de ces moments forts avant d'ajouter que le couplage "apports technologiques" et "apports réglementaires" favorisent une meilleure précision des travaux et une meilleure efficacité du topographe. Ceci, à la condition que les acteurs appliquent les avancées réglementaires! Ainsi, chaque acteur a son rôle à jouer:

- L'OGE est chargée de l'information et de la formation, de l'incitation, de la politique globale cohérente, de la



Projection conique conforme 9 zones

veille technique, de faire confiance aux jeunes;

- les écoles, quant à elles, sont censées mettre à jour la formation, fournir les raisons historiques, expliquer les enjeux de la précision, de la maintenance des transferts, des calculs et des échanges, faire preuve de persuasion.
- Les donneurs d'ordre publics sont censés veiller à l'information et à la formation, à la veille réglementaire, faire preuve de fermeté, tenir une politique globale cohérente, faire confiance aux jeunes !
- Les éditeurs / les constructeurs doivent être conscients des enjeux de la précision, faire de la veille technologique, maintenance des transferts, des calculs, des échanges, des paramétrages.
- L'IGN et la DGI doivent faire le pas de la prise de conscience... à l'acte.

Pour conclure, il ajouta que l'évolution technologique n'est pas suffisante. Celle des mœurs et coutumes doit l'accompagner pour révolutionner la topographie et en faire la partie dominante des SIG.

Conclusion générale

"Nouvelles technologies: quelles (r)évolutions pour la topographie?". Les (r)évolutions passées ont été évoquées, les (r)évolutions à venir restent une surprise... et tant mieux !

Chaque intervenant à la Tribune a évoqué les révolutions les plus marquantes à ses yeux; toutes différentes et pourtant tellement corrélées et entrelacées... Par conséquent, toutes les conclusions amenaient au même constat: nous avons le devoir de remettre perpétuellement nos connaissances en question, afin d'être ouvert à de nouveaux modes de pensées et de travail.

Il a également été souligné que chaque acteur a un rôle primordial à jouer: les écoles d'ingénieurs doivent adapter et anticiper l'évolution de la formation, les constructeurs de matériels et éditeurs de logiciels doivent permettre de démocratiser les technologies, s'ouvrir à des secteurs transversaux de communication, de positionnement,...

L'évolution peut devenir une révolution inquiétante car nous n'en sommes par vraiment maîtres ! Elle touche alors au pouvoir et bouleverse les rapports de force. Elle en devient de ce fait profondément déstabilisatrice. Finalement, la révolution n'est-elle pas qu'un remous, un sursaut périodique dans la linéarité inéluctable de l'évolution ? N'est-elle pas, comme le suggère le plasticien Jean Dubuffet "qu'un simple tour de sablier" ? ●

Contacts

Tania LANDES - Jacques LEDIG

INSA de Strasbourg
tania.landes@insa-strasbourg.fr
jacques.ledig@insa-strasbourg.fr

Nota : les prochaines Journées de la Topographie de l'INSA de Strasbourg auront lieu du 24 au 26 septembre 2007 (www.insa-strasbourg.fr/topographie/)

Olivier Reis

Ingénieur géomètre-topographe ENSAI Strasbourg
Diplômé de l'Institut de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg
9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES
Téléphone : 03 87 98 57 04 Télécopie : 03 87 98 57 04 E-mail : o.reis@infonie.fr

Pour toutes vos traductions d'allemand et d'anglais en français en
topographie - géodésie - photogrammétrie - SIG - cartographie - GPS

Reinhart Stölzel

Ingénieur géomètre-topographe
Interprète diplômé de la Chambre de commerce et d'industrie de Berlin
Heinrich-Heine-Strasse 17, D-10179 BERLIN
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60 Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61 E-mail : reinhart.stoelzel@eplus-online.de

Pour toutes vos traductions de français et d'anglais en allemand en
topographie - géodésie - SIG - GPS - chemin de fer - routes

Paul Newby

Membre de la Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS)
Diplômé des universités de Cambridge (géographie) et de Londres (photogrammétrie)
9 Merrytree Close, West Wellow, Romsey, Hants SO51 6RB GB
Téléphone : 00 44 1794 322 993 Télécopie : 00 44 1794 324 354 E-mail : paulnewby@onetel.net.uk

Pour toutes vos traductions de français en anglais en
topographie - géodésie - GPS - SIG - cartographie - photogrammétrie - télédétection

Des topographes traducteurs à votre service

La mesure des bases de la méridienne de France (1792 – 1798)

La base de Perpignan

■ Patrick VALETTE

Installée par Méchain entre l'automne 1795 et l'hiver 1796, elle se situe entre le village de Salses-le-Château et le lieu-dit "Le Vernet", faubourg situé à la périphérie Nord de Perpignan. Delambre est arrivé à Perpignan le 4 thermidor an 6 (22 juillet 1798). Au grand dam de Méchain, la base de Perpignan (base de vérification) a été mesurée par MM. Delambre, Tranchot et Pommard entre le 19 thermidor et le 1^{er} jour complémentaire de l'an VI (6 août - 17 septembre 1798) dans le sens Salses → Le Vernet.

La mesure de cette base était normalement dévolue à Méchain mais compte-tenu du retard de ce dernier dans la détermination de ses triangles, Delambre qui avait terminé sa triangulation est donc venu mesurer aussi cette base. Certes, il a demandé à Méchain de venir la "toiser" avec lui mais fâché avec Tranchot (on ne connaît pas l'objet exact de leur dispute), Méchain ne voulait surtout pas participer à cette mesure avec son "pire ennemi" bien qu'il en fut particulièrement affecté.

Dans une lettre du 15 fructidor an 6 à Delambre (écrite à Carcassonne après avoir rejoint son mari en messidor an 6), Mme Thérèse Méchain (surnommée "Marjou") précise notamment au sujet de cette affaire: "... J'ai dit à cela qu'un Tranchot substitué à Méchain, cela ne pouvait prendre qu'après des servantes d'auberges...". Il s'agit bien d'un affront fait à Méchain... Delambre rapporte que l'alignement a pris sept jours et que les mesures se sont déroulées sur 41 journées, sans compter trois jours de "vent impétueux" qui obligèrent à stopper les opérations.

Une anecdote insolite qui mérite d'être rapportée. Lors de la 36^e journée (26 fructidor an VI) de la mesure de la base de Perpignan, il est consigné à l'identique dans les registres de Pommard et Tranchot les faits suivants:

"Au moment où on allait arrêter, il est survenu un dérangement: plusieurs chiens sont venus se battre entre les règles et nous ont fait perdre tout le travail de ce jour".

Le 27 (13 septembre 1798), il a donc fallu recommencer l'ouvrage du 26 (12 septembre) comme le notifient scrupuleusement Tranchot et Pommard dans leurs registres réciproques.



© Patrick VALETTE

Le terme boréal

Le terme boréal de la base de Perpignan, situé au sud de la commune de Salses-le-Château, est matérialisé actuellement par un socle surmonté d'une petite pyramide (fin XIX^e siècle). Il se trouve au croisement de la route menant au village depuis la Nationale 9 et jouxte une parcelle de vigne qui s'étend à l'ouest vers la voie ferrée.

Sur ce pôle boréal, on peut lire l'inscription "Méridienne de France, Base de Perpignan, mesurée par Delambre en 1799, mesurée de nouveau par les Officiers du Service Géographique de l'Armée en 1891". Il est à noter qu'une erreur de date figure sur cette épigraphe car la mesure de la base a été effectuée à la fin de l'an VI de la République, soit en 1798.



Terme Boréal de la base de Perpignan à Salses-le-Château.

Une plaque de cuivre poli de 4 pouces et demi marquée d'un point et recouverte d'une plaque de plomb, installée par Delambre, matérialise le terme boréal (le 20 thermidor: *"On recouvre le terme boréal en maçonnerie comme auparavant"*). Bien sûr, l'édifice mis en place après 1891 coiffe et protège ce repère géodésique.

Le terme austral

Le pôle austral a été implanté au nord de la ville de Perpignan. Ce lieu correspond de nos jours au lieu-dit "carrefour de la patte d'oie", dans le quartier du Haut-Vernet, à l'intersection des avenues du Languedoc, de l'aérodrome et du Maréchal Joffre. Le monument (sis à l'angle de l'avenue de l'aérodrome et de l'avenue du Languedoc), symbolisant le terme austral, ainsi que le repère géodésique, sont identiques à ceux du terme boréal. Toutefois, la singularité de cette station réside aujourd'hui dans le magnifique "trompe-l'œil" réalisé à cet endroit. En effet, intitulée "Buvette de la Méridienne", cette véritable fresque historique de la mesure orne la façade de la maison qui toise la pyramide du terme austral de la base de Perpignan. Cette peinture murale personifie admirablement cette mesure de la Méridienne.

Un café à l'enseigne "Buvette de la Méridienne" fait face à ce terme austral. A l'étage, sur un balcon de fer forgé, un astronome, vêtu d'époque fin XVIII^e, réalise des levés avec un cercle répétiteur flambant neuf (le nom de Jean-Baptiste Delambre est inscrit au-dessous sur le rebord du balcon et le



Terme Austral de la base de Perpignan au Vernet.

nom de Borda sur le cercle répétiteur lui-même) tandis qu'un autre savant le seconde à main droite (inscription de Pierre Méchain au-dessous également). Une treille de vigne court entre deux étages et, sous le faite de la toiture, un cadran solaire porte l'inscription solennelle *"A tous les temps, A tous les peuples"* chère à Condorcet (une date en chiffres romains XI MM indique que ce dessin a été réalisé en novembre 2000).

Ce superbe trompe-l'œil aux couleurs chaudes, réalisé avec finesse et précision, constitue une œuvre remarquable. Dénommée "La buvette", cette fresque couvre une superficie de 100 m² et a été réalisée en 2000 par un peintre perpignais, Monsieur Bernard Gout, lors de l'aménagement de ce carrefour. Initié par une association de quartier, ce projet d'exception a fait l'objet d'un appel d'offre auprès d'artistes spécialisés dans l'exécution de grands formats afin de réaliser une peinture murale évoquant l'histoire de cette place. Sept dessins ont été proposés, tous d'une haute qualité. Ils ont ensuite "circulé" dans le quartier et à l'unanimité le dessin intitulé "Bar La Méridienne" a emporté la majorité des suffrages (Bar qui deviendra Buvette lors de la réalisation) ⁽¹⁾.

C'est en s'inspirant d'une carte postale de la fin du XIX^e siècle (où figurait effectivement un café à côté de la borne méridienne, voir ci-après), que Monsieur Bernard Gout a réalisé ce chef d'œuvre. Sa signature apparaît à droite du dessin dans

(1) Article du journal "L'Indépendant" du jeudi 16 novembre 2000 ("PERPIGNAN QUARTIERS", page 8).



© Patrick VALETTE

■ ■ ■ l'enseigne publicitaire (B.G. & GOUT). On peut deviner sous l'inscription "Buvette de la Méridienne" l'ancienne appellation de ce café "Bar des Trams". En effet, ce café était situé sur la ligne de tramway qui reliait Perpignan. Enfin, Bernard Gout a orné son œuvre de quelques détails amusants pour l'œil curieux : un chat joueur sur le balcon, une petite culotte à la fenêtre supérieure entrouverte et les inscriptions "Laurent Jade" et "Débit de lait" à la devanture du bar.

Financée par le Conseil Général des Pyrénées-Orientales, la Mairie de Perpignan et l'Association des entreprises de la zone Polygone Nord, la réalisation de Monsieur Bernard Gout est remarquable tant du point de vue artistique que de la fidélité historique (Delambre et Méchain, cercle répéteur de Borda, "A tous les temps, A tous les peuples"...).

Bernard GOUT a accompli un travail d'une exceptionnelle qualité. Bravo l'artiste !

La base elle-même

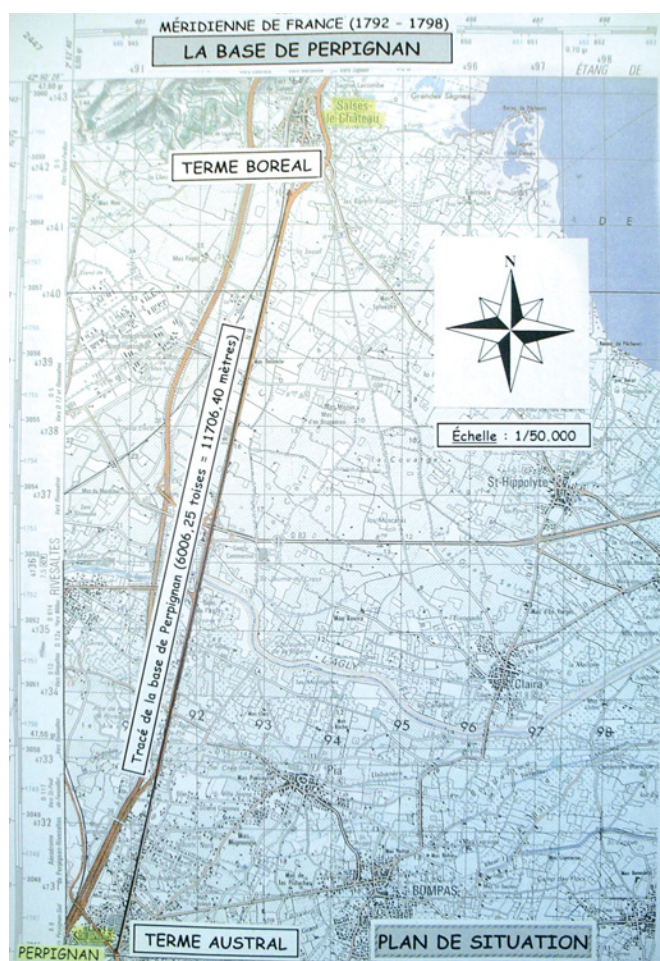
La mesure de la base de Perpignan a donné une longueur de 6006 t 247848, portée à 6006 t 25. En prenant la valeur de 1,9490366 m pour la toise, cette distance s'élève donc à 11 706,40 mètres. Preuve que les mesures ont été réalisées avec la plus parfaite exactitude, ce fait rapporté par Delambre lui-même. Un vent très fort ayant pu altéré les mesures du 8 fructidor (140 toises mesurées), elles sont reprises le 11 fructidor quand le temps se fait plus clément ("le 11, nous recommençons la besogne du 8"). La différence entre ces deux mesures s'est révélée infime : moins d'une demi-ligne soit moins d'un millimètre sur un peu plus de 270 mètres...



(Collection Patrick VALETTE)

Carte Postale Ancienne ayant inspirée la fresque du Haut-Vernet "Buvette de la Méridienne"

De nos jours, la projection de la base suit exactement la Nationale 9 sur les trois quarts de sa distance avant de se prolonger parfaitement sur l'avenue du Languedoc jusqu'au Vernet. Il s'agit en fait de l'ancienne route qui permettait de joindre Perpignan par le pont Joffre. On s'aperçoit donc, deux siècles plus tard, que cette grande ligne droite se superpose totalement avec des routes actuelles. ●



Plan de situation de la base de Perpignan extrait de la carte IGN au 1/25 000 : Perpignan 2548 OT (Échelle au 1/50 000 non respectée sur cette photo)

Evaluation de différentes méthodes d'interpolation spatiale pour la production d'un MNT à partir de données topographiques dans un SIG

■ Noamen REBAI, Tarek SLAMA et Mohamed Moncef TURKI

La vraie puissance du système d'information géographique (SIG) réside dans l'analyse de l'information spatiale. Cette dernière nécessite le paramétrage de la continuité spatiale ainsi qu'un suivi de régularité surfacique qui ne peut être assuré que par interpolation. Cet article présente une approche méthodologique quantitative pour l'évaluation de six méthodes d'interpolation utilisées dans la production d'un modèle numérique de terrain (MNT) à partir de données topographiques vectorielles dans un SIG. Divers paramètres statistiques sont utilisés et analysés pour évaluer ces méthodes et déterminer le ou les meilleurs interpolateurs.

■ mots-clés

MNT, SIG, interpolation, analyse statistique, données topographiques

En sciences de la terre et particulièrement dans les disciplines de la géologie, la géographie et la géomorphologie, la modélisation du terrain par la production du modèle numérique de terrain (MNT) est très importante. C'est à partir de ce modèle spatial continu et régulier que se sont effectués plusieurs analyses et traitements. Le MNT contient une véritable mine d'informations sur la configuration du relief sous forme de paramètres morphométriques et topographiques (Grohmann, 2004). De nombreuses cartes comme celle de la distribution ci-dessus des glissements de terrain sont produites en se basant principalement sur l'étude du MNT (Gaspar *et al.*, 2004).

Actuellement, les sources de données pour la production d'un MNT sont très variées, mais la carte topographique (échelle 1:50 000 ou 1:25 000) reste la plus facile d'accès et la plus répandue. Le SIG constitue l'unique environnement permettant une production par la procédure d'interpolation spatiale. Cette puissante technique permet la génération d'une surface continue ou grille régulière selon une résolution contrôlée. Mais il existe plusieurs méthodes

d'interpolation dans le SIG, et il est bien démontré qu'il n'existe pas une méthode universelle parfaite à tous types de données spatiales ((Rhind, 1975 ; Lam, 1983 ; Sarközy, 1999 ; Hamrah *et al.*, 2006).

Le présent article, qui entre dans le cadre des travaux de recherches visant à exploiter le MNT d'une région d'un contexte géologique et géomorphologique assez compliqué, présente une étude comparative de six méthodes d'interpolation les plus utilisées en sciences de la terre : (1) l'Inverse Distance (IDW), (2) la Courbure Minimale, (3) le Voisin Naturel "Natural Neighbor", (4) le krigage ordinaire par point, (5) le krigage ordinaire par bloc et (6) le Polynôme Local. Pour l'évaluation de leurs performances, une méthodologie d'analyse statistique quantitative est mise en place. Elle se base sur : (i) l'examen de l'ensemble des données topographiques interpolées par la méthode de validation croisée (Cross Validation), (ii) l'analyse statistique et visuelle (sous la forme de cartes des erreurs d'interpolation) des résiduels et (iii) l'étude détaillée des échantillons de points altimétriques $z f(x, y)$ de l'ensemble des méthodes.

Un inventaire statistique détaillé du secteur d'étude est également nécessaire pour examiner la base de données et mieux comprendre sa distribution géographique et spatiale. Pour ce faire une approche d'analyse visuelle et statistique est aussi mise en place.

Le but principal de cette étude est d'estimer statistiquement, suivant une méthodologie quantitative, la performance des interpolateurs testés pour générer, dans un SIG, un MNT à partir des données topographiques d'une zone présentant une géomorphologie plutôt compliquée et ainsi de mettre en évidence le rapport entre fonction d'interpolation et nature des données spatiales et donc d'examiner les facteurs agissant sur cette fonction qui peuvent être une source potentielle d'erreur.

Présentation de la zone d'étude

Le secteur de Jebel Kechtilou-Jebel Jebes est une importante zone située en Tunisie septentrionale qui fait partie de l'orogène atlasique nord africain édifié au cours des serrages de l'Eocène et du Miocène (Figure 1, A). Géologiquement,

■ ■ ■

- il présente une complication structurale majeure à cause des extrusions triasiques qui ont affecté, par les mouvements halocinétiques, les séries post-triasiques et ont engendré une morphologie spécifique.

La figure 1(B) présente la configuration topographique des deux massifs majeurs de la zone étudiée. Le premier est celui du Jebel Kechtilou (encadré bleu d'en bas) et le second est celui du Jebel Jebbs (encadré bleu d'en haut dans la même figure).

Les techniques d'interpolation spatiale

■ Vue d'ensemble

Généralement, plusieurs informations géographiques de différentes natures peuvent être mesurées et largement utilisées dans des procédures variées d'analyse spatiale. A l'origine, ces informations sont de nature continue dans l'espace géographique tridimensionnel et il est évidemment impossible de mesurer leurs valeurs en tous points de l'espace qu'elles occupent, mais uniquement au niveau des endroits types d'une manière irrégulière et selon la technique d'échantillonnage utilisée (the sampling).

Ainsi, l'interpolation est la technique qui permet de donner par estimation des valeurs aux points non échantillonnés en se basant primordialement sur ceux dont les valeurs et les positions sont connues dans le même espace. Le résultat immédiat de cette opération est la génération d'une surface continue et régulière (dépendant de la résolution) qui est une représentation bidimensionnelle de la surface tridimensionnelle appelée grille ou MNT dans le cas des données topographiques.

Dans le SIG il existe plusieurs méthodes d'interpolation qui donnent généralement des résultats variés et différents. Il existe plusieurs approches pour classer ces méthodes (Hartkamp *et al.*, 1991 ; Sarközy, 1999) mais sommairement on distingue trois critères de classification selon que l'interpolateur soit :

- local ou global

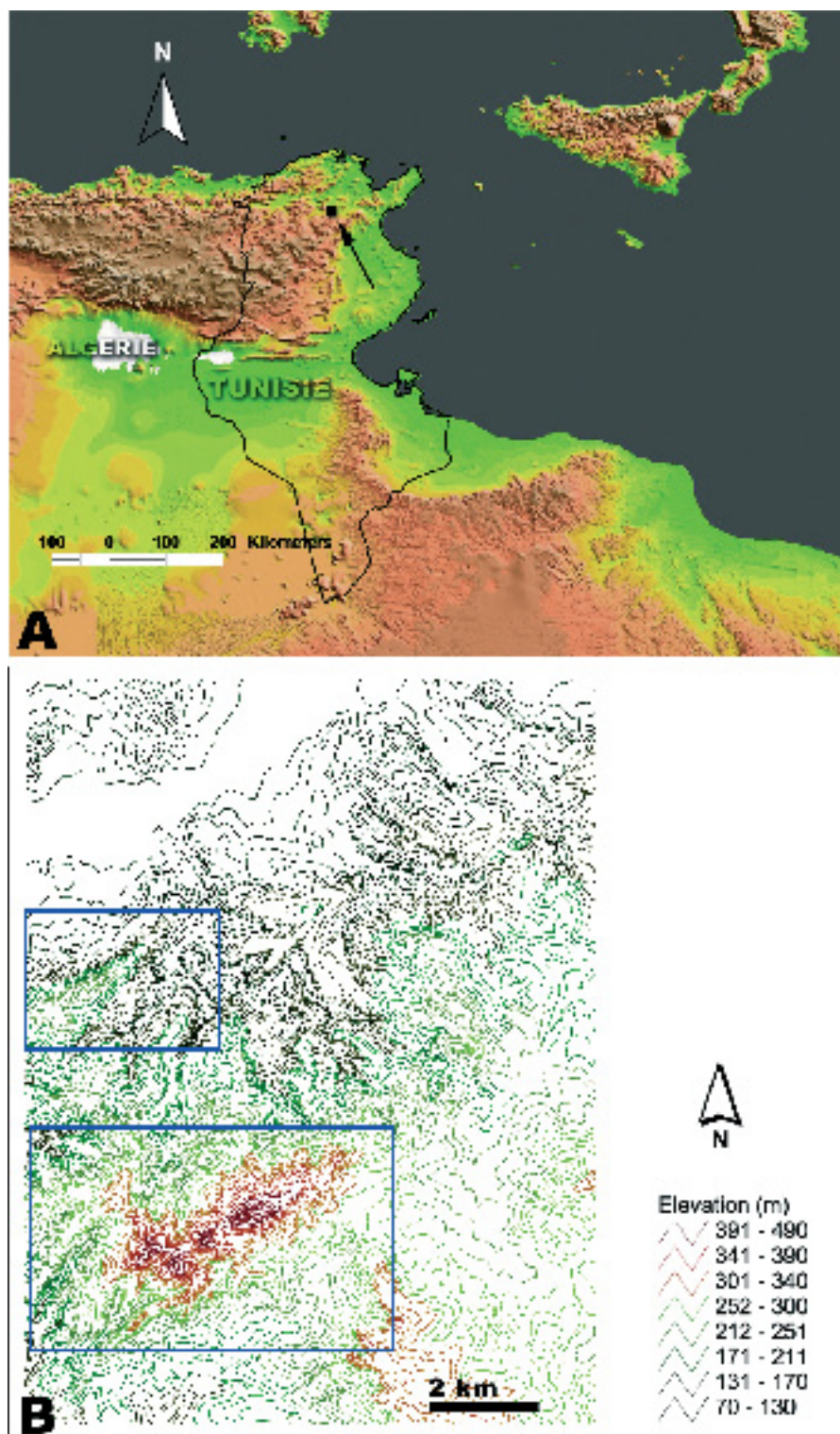


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude. En A sa situation géographique et en B sa carte topographique représentée par des courbes de niveau avec une équidistance de 10 m.

- stochastique ou déterminatif (empirique)
 - exact ou approximatif
- Les méthodes globales comme "la surface de tendance ou the trend surface "

et les équations polynomiales sont largement utilisées pour modéliser des variations de grandes étendues et, comme son nom l'indique, estimer la spécificité régionale du phénomène étudié.

dié. La plupart des techniques d'interpolation sont locales et déterminatives à l'exception du krigeage qui est de nature stochastique. Ce dernier est généralement considéré comme un interpolateur exact.

De nombreux travaux de recherche sur l'analyse des données représentant l'espace géographique ont recours aux méthodes d'interpolation pour l'estimation et la prédiction des modèles de distribution. En climatologie l'interpolation est utilisée pour l'estimation des températures journalières (Collins et Bolstad, 1996) et des précipitations au niveau des zones montagneuses (Creutin et Obled, 1982 ; Tabios et Salas, 1985 ; Phillips *et al.*, 1992) avec la recommandation d'utiliser les méthodes de l'Inverse Distance et la Régression Polynomiale comme interpolateurs. En hydrologie, Nash et Sutcliffe (1970) présentent une approche statistique pour prédire le flux fluvial. Pour les données du sol, les techniques les plus fiables sont le krigeage et la surface de tendance (Stein *et al.*, 1988, 1989).

D'autres travaux ont modélisé par interpolation la distribution du pH dans le sol (Laslett *et al.*, 1987). Dans le domaine de la géophysique, la méthode de la courbure minimale est la plus fréquemment utilisée avec les données gravimétriques et magnétiques pour l'estimation des pièges potentiels des hydrocarbures (Mendoza et Silva, 1995 ; Cooper, 2000), alors que dans l'industrie minière c'est l'inverse distance (IDW) qui est l'interpolateur le plus recommandé (Collins et Bolstad, 1996).

Le champ d'application des méthodes d'interpolation dans un SIG est très vaste et intéresse presque toutes les disciplines des sciences de la vie (médecine, biologie, botanique, etc.) et des sciences de la terre. De ce fait, il est vraiment indispensable d'avoir mis en place une méthodologie d'analyse pour tester et quantifier les erreurs des estimateurs mathématiques.

■ Méthodes utilisées

Six méthodes d'interpolation spatiale sont comparées dans l'étude afin d'évaluer la ou les plus performantes d'entre-

elles pour la production d'un MNT à partir des données topographiques d'un SIG. Ces méthodes sont couramment utilisées dans les sciences de la terre pour modéliser différents paramètres de la réalité géographique du territoire (cf. supra).

Les techniques évaluées sont exposées ici brièvement sans entrer dans le détail mathématique des équations qui sont bien énoncées et précisées dans de nombreuses publications dont celle de Sarkozy (1999).

- L'inverse distance (couramment désigné par les lettres IDW: Inverse Distance Weighting) est une méthode d'estimation locale et déterminative qualifiée d'interpolateur exact. Elle suppose que les valeurs tout près de l'emplacement non échantillonnées sont plus représentatives de la valeur à être estimée que celles des échantillons plus éloignés (Franke, 1980). Ses résultats sont bons lorsque les valeurs à interpoler sont régulièrement échantillonnées. Il s'agit d'une méthode simple à utiliser.
- La courbure minimale (the minimum curvature method) de Briggs (1974) est une technique déterminative locale présentant une interpolation approximative. Elle produit la surface la plus lisse possible à partir des données disponibles (pour plus de détail voir Smith et Wessel, 1990). Cette méthode est largement adoptée par les géophysiciens.
- Le voisinage naturel (the natural neighbor) est également une méthode déterminative locale qui, dans son algorithme d'interpolation, se base sur la moyenne pondérée des valeurs voisines pour effectuer une estimation de la valeur non échantillonnée (Sibson, 1981). Cette méthode est commune à certains domaines de la géoscience (géostatistique et estimation des tenseurs en particulier).
- Le krigeage est une méthode locale stochastique (ou géostatistique) développée par Matheron (1963, 1970). Il s'agit d'un interpolateur exact qui tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux

(c'est-à-dire l'interdépendance des variables), et prend en considération la continuité spatiale de la zone étudiée. C'est une méthode d'estimation linéaire minimisant la variance d'estimation telle que calculée à l'aide du variogramme. Il existe généralement deux types de krigeage: universel et ordinaire, avec un avantage du dernier qui est le plus fréquemment utilisé et considéré comme un bon estimateur des données interpolées. Dans l'étude comparative deux méthodes de krigeage ordinaire par point et par bloc seront testées et évaluées.

- Le polynôme local est une méthode globale simple. Elle se base sur le "moindre carré pondéré" lors de l'interpolation pour la génération de la grille régulière. La tendance locale de cette technique peut être intéressante dans le domaine de l'interpolation des variables topographiques d'un terrain géologique.

Méthodologie et approche d'analyse

L'évaluation rigoureuse de ou des meilleurs interpolateurs est soumise à une méthode d'analyse statistique et visuelle. Celle-ci intègre de nombreux paramètres et coefficients statistiques et se développe comme suit.

■ Analyse des données topographiques

Les données topographiques sous format vectoriel du secteur d'étude (Figure 1, B) sont issues d'une numérisation de la carte topographique de la région de Mejez el Bab à l'échelle 1:50 000 avec une équidistance des courbes de niveaux surfacique de 10 m. Ces dernières sont transformées en une base de données "ponctuelles" composée de 38712 valeurs d'altitude au format (x, y, z) stockées dans un fichier d'extension .dbf.

L'analyse montre que l'ensemble des données présente une répartition légèrement asymétrique reflétant une faible valeur du coefficient d'obliquité (coefficient of skewness) comme le montre le tableau 1. Ce coefficient est sensible à la

- distribution des données dans l'espace géographique et permet de mesurer son asymétrie. Pour une distribution parfaitement symétrique sa valeur est égale à zéro. Ce coefficient est calculé par :

$$\text{Coef_Skewness} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z_m) \left(\frac{1}{SD} \right) \right) [1]$$

Avec N est le nombre total des données d'altitude, Z_i et Z_m sont respectivement l'altitude d'un point en un emplacement, $i = f(x, y)$ et la moyenne des altitudes. SD représente la déviation standard.

La distribution des données présente une forme dite "Leptokurtique" comme le montre l'histogramme de la Figure 2, ainsi qu'une valeur de Kurtosis égale à 2.74 indiquant également une légère asymétrie dans la distribution des données. Ce paramètre est calculé par le coefficient de Kurtosis (équation 2). Une valeur égale à 3 montre qu'il existe une symétrie dans la distribution.

$$\text{Coef_Kurtosis} = \left(\frac{1}{N * SD} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z_m)^4 \right) - 3 [2]$$

Il est important d'avoir un aperçu visuel sur la distribution moyenne des données topographiques ainsi que sur la répartition de leurs densités dans l'espace géographique. Ainsi, deux types de cartes ont été créés pour examiner ces deux aspects. La carte des altitudes (Figure 3) montre clairement l'existence de trois zones distinctes qui sont du

Nombre de points	38712
Minimum	70
Maximum	490
Moyenne	214.92
Erreur Standard	0.4079
Variance	6462
Déviatoin moyenne	65.28
Déviatoin standard	80.25
Coefficient de variation	0.37362
Coefficient d'obliquité (Skewness)	0.443
Coefficient de Kurtosis	2.743
Médiane	210

Tableau 1 : Différents paramètres statistiques extraits de la base de données.



Figure 2: Histogramme et statistique sommaire des valeurs topographiques de la base de données.

Sud au Nord: une première où se concentrent des valeurs d'altitude élevées, une deuxième des valeurs moyennes et une troisième de faibles valeurs (ne dépassant pas 150 m). La densité des données topographiques est très élevée essentiellement au niveau de la première zone et généralement faible au niveau des autres (Figure 4).

■ Analyse des données interpolées par "cross validation"

Les données topographiques ainsi préparées (38712 points ou valeurs altimé-

triques) sont interpolées par les différentes techniques pour produire les modèles numériques de terrain correspondants. Une analyse visuelle sur ces modèles ne donne absolument aucune information sur les différences entre les interpolateurs testés et même montre que les MNT sont identiques (Figure 5).

La méthode de la validation croisée ou "cross validation" est un ensemble des paramètres statistiques permettant d'évaluer l'erreur d'estimation pour chaque méthode d'interpolation testée et cela pour la totalité des données des grilles ou MNT générés (Tableau 2).

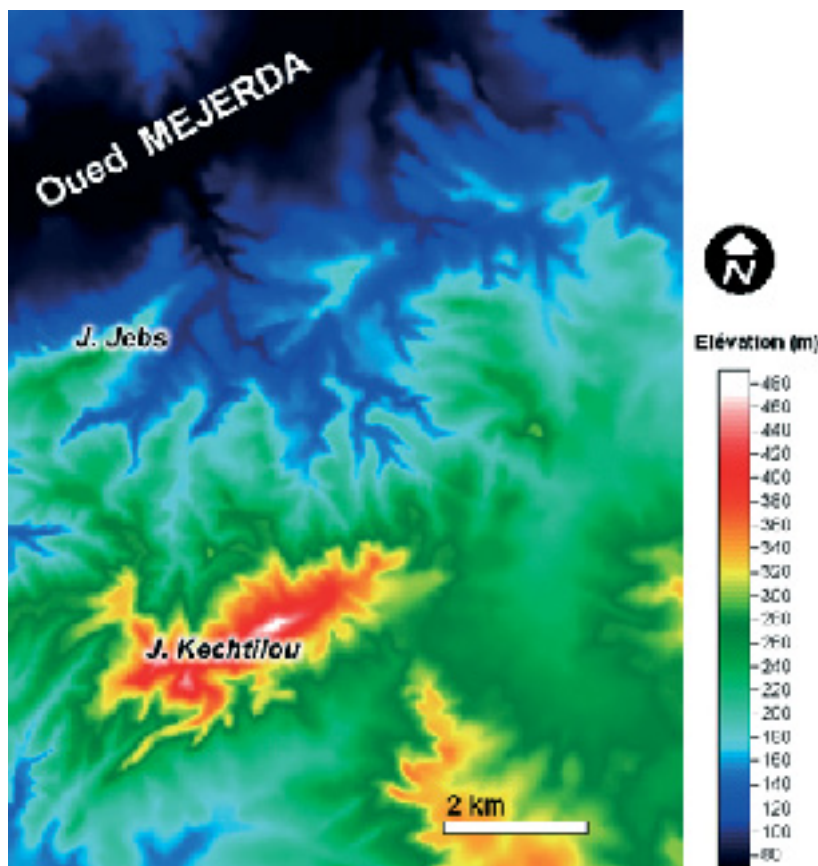


Figure 3: Carte de distribution des altitudes.

Le tableau 4 montre que l'erreur standard (Es) présente des valeurs faibles pour les méthodes de: krigeage, l'inverse distance et le voisin naturel, alors qu'elles sont plus élevées pour la courbure minimale et le polynôme local. Ce qui est confirmé par les valeurs de l'erreur moyenne (EM) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE). Cette dernière est considérée comme une méthode d'estimation absolue (équation 3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad [3]$$

Avec n est le nombre des données interpolées, O_i et P_i sont respectivement les valeurs observées et interpolées dans un emplacement i de coordonnées (x, y) dans l'espace géographique bidimensionnel. Plus la valeur du RMSE est faible plus l'estimation de l'interpolateur est bonne.

Le coefficient d'obliquité (Sk) indique que la méthode de la courbure minimale permet d'avoir une faible distribution asymétrique des valeurs interpolées. Pour le coefficient de régression (R) plus la valeur tend vers 1 plus l'interpolation est exacte. Or, pour l'ensemble des techniques testées R est proche de 1 sauf pour celle du polynôme local (0.781) et avec un léger avantage du krigeage par point (0.933).

■ Analyse des résiduels

Le résiduel est la différence entre la valeur observée (O_i) et la valeur interpolée ou prédite (P_i) dans un emplacement i, ce qui correspond à l'erreur de l'interpolation. Ainsi, l'étude comparative du résiduel de l'ensemble des techniques d'interpolation spatiale testées permet d'avoir d'importantes informations sur chaque méthode et d'évaluer plus précisément la marge d'erreur qu'elle produite lors de l'interpolation.

Pour le calcul du résiduel il a été tenu compte de la différence entre les valeurs d'altitude de la base de données initiales, produite à partir des données topographiques avant l'interpolation, et celles d'une base de données extraites de la grille interpolée aux mêmes emplacements. Cette opération est effectuée pour chaque méthode d'interpolation.

Méthode d'interpolation	T en s	Es	Valeur mal estimée (en m)	(EM)	RMSE	R	Sk
Inverse Distance (Inverse Distance Weighting)	17.7	0.64	260	0.009	1.42	0.848	0.66
Courbure minimale (Minimum Curvature)	4.1	0.74	310	0.049	1.52	0.814	0.38
Voisin naturel (Natural Neighbor)	4.8	0.52	150	0.004	1.13	0.870	0.68
Polynôme local (local polynomial)	8.9	1.08	320	0.032	2.12	0.781	0.61
Krigeage par point (point kriging)	38.4	0.22	140	0.003	0.63	0.933	0.52
Krigeage par bloc (block kriging)	31.5	0.23	140	0.003	0.97	0.884	0.61

Tableau 2 : Résultat de l'analyse par "Cross Validation".

	Minimum (m)	Maximum (m)	Erreur standard	SD	K	RMSE
Inverse Distance	-37.5	32.6	0.3	6.0	1.18	4.82
Courbure minimale	-31.9	32.2	0.27	5.48	1.63	5.72
Voisin Naturel	-40.3	30.1	0.26	5.11	3.25	2.13
Polynôme local	-37.9	30.1	0.28	5.57	1.62	8.12
Krigeage par point	-20.5	24.9	0.24	4.83	4.07	1.73
Krigeage par bloc	-41.4	32.1	0.21	5.86	2.67	1.97

Tableau 3 : Analyse statistique des résiduels de chaque méthode d'interpolation. SD c'est la déviation standard, K est le coefficient de Kurtosis et le RMSE est l'erreur moyenne quadratique.

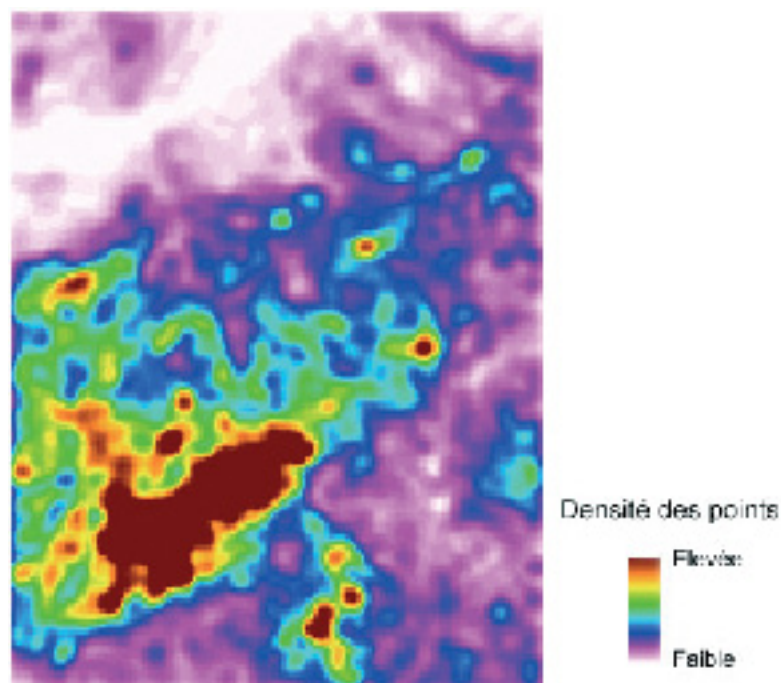


Figure 4 : Carte de répartition de la densité des valeurs altimétriques $z = f(x, y)$.

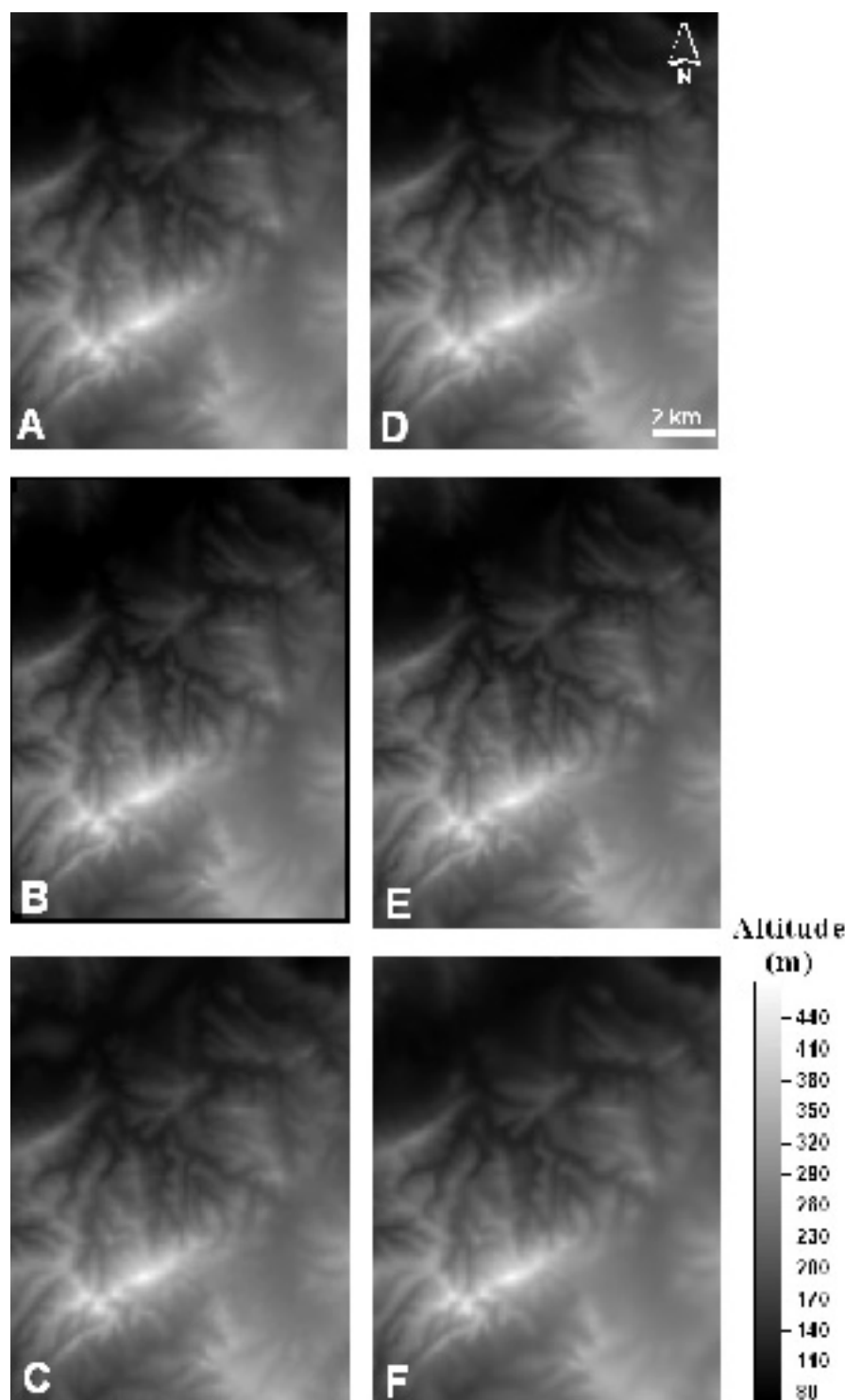


Figure 5 : Les MNT produits par les méthodes testées. A. Inverse distance, B. Voisin naturel, C. Courbure minimale, D. Krigeage par point, E. Krigeage par bloc, F. Polynôme local. La résolution des grilles est de 100 x 78 (donc 7800 cellules).

■ ■ ■ Le tableau 5 indique que la distribution de l'erreur est presque symétrique pour le krigeage par point et le voisin naturel puisqu'elles présentent les valeurs les plus élevées du coefficient de Kurtosis

(K). Ce qui veut dire que ces deux méthodes tendent à homogénéiser l'erreur au niveau de la grille produite par interpolation. Pour le krigeage par point, la différence entre le minimum et le

maximum du résiduel est la plus faible ainsi que pour la valeur du RMSE qui est très élevée dans le cas du polynôme local (8.12).

Les bases de données des valeurs résiduelles établies précédemment sont exploitées visuellement pour produire des cartes de la distribution des erreurs d'interpolation (ou résiduels) pour chaque méthode étudiée (Figure 6). Cela constitue une approche originale permettant à la fois de connaître la diffusion des erreurs dans le secteur étudié et de mettre en évidence la relation entre l'importance des résiduels et les caractéristiques topographiques du terrain (voir paragraphe *Analyse des données topographiques*).

Ces cartes constituent une importante source d'information et permettent l'exploitation statistique de plusieurs types de relations spatiales que pouvaient avoir les résiduels avec les autres paramètres topographiques du terrain.

L'analyse de la figure 6 montre que le krigeage par point présente sommairement une distribution homogène d'une valeur d'erreur généralement faible (entre -2 m et 2 m) avec localement la présence de valeurs élevées (représentées par de petites taches de couleur blanche). Pour l'inverse distance et le polynôme local la distribution des valeurs élevées de résiduel est importante sur la totalité du secteur étudié, alors que pour le reste des techniques cette distribution se localise au niveau des zones à forte topographie (partie sud). Cependant, cette dernière présente les densités les plus élevées des données d'altitude (Figure 4), mais du point de vue géomorphologique cette zone se caractérise par des changements brusques et brutaux d'altitudes ainsi que la présence de nombreuses discontinuités structurales.

Cette observation peut suggérer l'utilisation des résiduels comme une méthode de localisation de certains paramètres purement de nature géomorphologique présentant une sensibilité particulière à une ou plusieurs techniques d'interpolation spatiale. Cette perspective de recherche à envisager reste à détailler et à examiner.

■ Approche d'une analyse statistique détaillée

Pour mieux encore comparer les différentes méthodes d'interpolation étudiées, une approche statistique détaillée est mise en œuvre. Elle s'appuie sur l'analyse des échantillons extraits à partir des bases de données définissant pour chacune des méthodes les valeurs interpolées à des emplacements identiques. Six échantillons renferme donc six valeurs. (cf. tableau 4).

Deux paramètres statistiques sont utilisés pour analyser l'ensemble des échantillons par rapport aux valeurs observées à savoir absolu et relatif.

Paramètres absolus

Beaucoup de paramètres d'évaluation statistique ont été passés en revue par Legates et McCabe (1999). Ces auteurs recommandent fortement l'utilisation d'au moins un paramètre de mesure d'erreur absolue (RMSE ou EAM) pour une évaluation complète et efficace de la performance du modèle produit. Généralement, les plus utilisées sont :

- l'erreur moyenne quadratique ou RMSE (Equation 3) qui place une importance particulière aux valeurs périphériques dans le jeu de données.

- l'erreur moyenne absolue ou EMA :

$$EMA = n^{-1} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad [4]$$

Avec n est le nombre des données utilisées (qui sont de six valeurs dans notre cas).

Paramètres relatifs

Ils sont considérés comme des indices non dimensionnels qui fournissent une comparaison relative d'un modèle par rapport à un autre (Kneale et Smith, 2001). Ces paramètres sont très recommandés pour l'évaluation des données interpolées par rapport à celles non interpolées. Il existe trois paramètres communément employés :

- le coefficient de détermination (Kneale et Smith, 2001)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}} \right]^2 \quad [5]$$

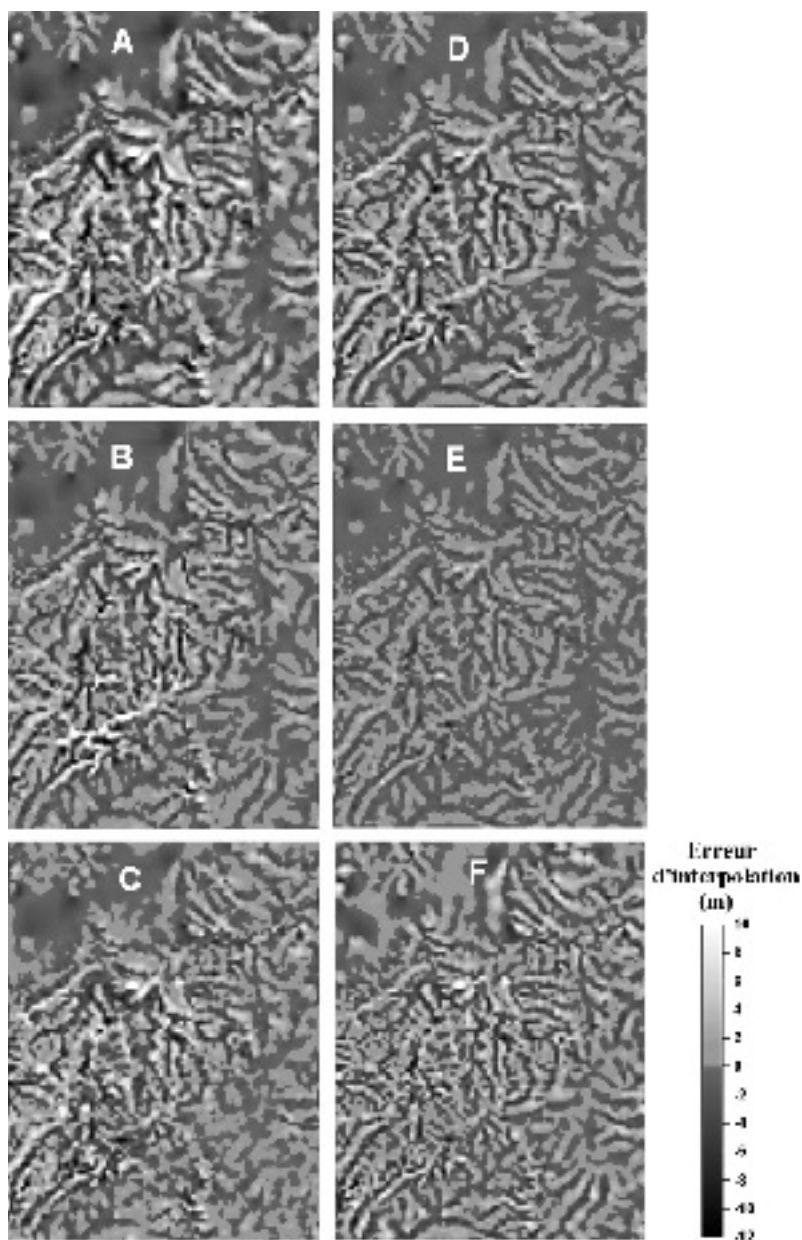


Figure 6 : Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (ou résiduels) pour chaque méthode. (Même légende que la figure 5)

	P _i					
	Krigeage par point	Krigeage par bloc	Inverse Distance	Polynôme local	Courbure minimale	Voisin Naturel
O _i						
430,00	433,34	444,33	451,88	449,43	442,71	438,07
350,00	363,33	365,71	376,18	375,15	371,72	366,01
260,00	257,87	261,32	248,52	269,36	265,01	258,01
200,00	203,93	205,04	206,50	209,13	203,79	209,20
110,00	111,67	102,00	102,75	119,07	110,24	111,95
70,00	69,67	68,51	60,18	69,57	69,26	69,27

Tableau 4 : Les différents échantillons utilisés. O_i est la valeur observée dans un emplacement i et P_i est celle interpolée (prédite) au niveau du même emplacement.

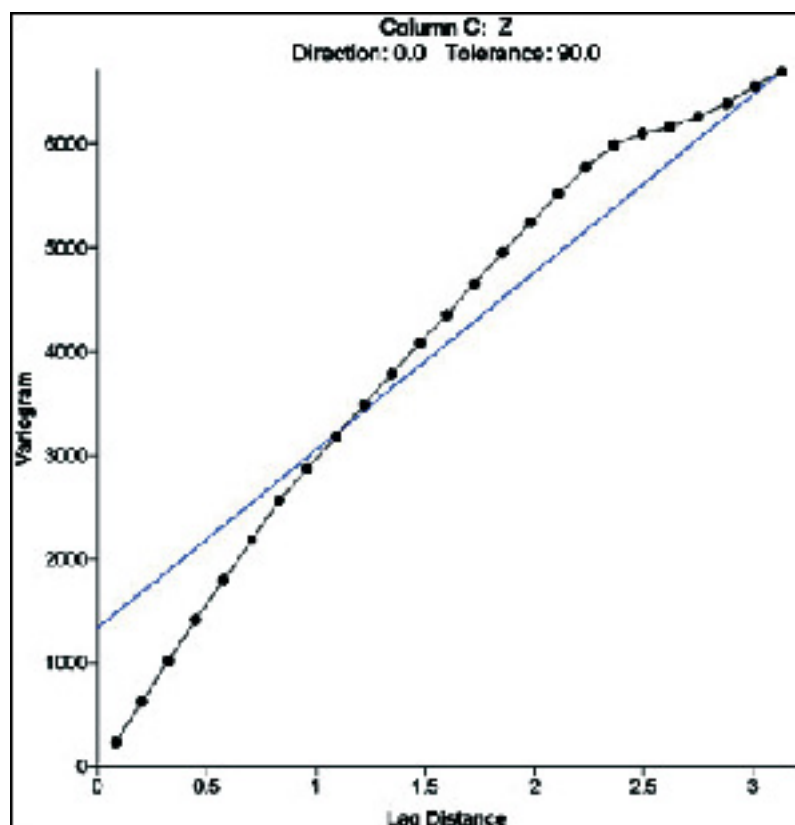


Figure 7 : Variogramme expérimental obtenu à partir des données topographiques testées.

- ■ ■ Avec O_m est la moyenne des valeurs observées et P_m est la moyenne des valeurs interpolées (ou prédites). n est le nombre des observations utilisé. Il s'agit du "coefficient de corrélation" élevé au carré. Cette mesure permet de quantifier la force du lien linéaire entre deux variables. R^2 est compris entre 0.0 et 1.0 avec une valeur élevée indiquant un haut degré de "colinéarité".

• le coefficient d'efficacité (Nash et Sutcliffe, 1970)

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \quad [6]$$

Une valeur de 1.0 présente une interpolation parfaite. Ce paramètre est largement utilisé en hydrologie.

• l'indice d'accord (Willmott, 1981)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n [|P_i - O_m| + |O_i - O_m|]} \quad [7]$$

d varie entre 0.0 et 1.0, si il est élevé cela indique un bon accord entre les valeurs observées (O_i) et celles interpolées (P_i). Une valeur de 1.0 indique un accord parfait alors qu'une valeur de 0.0 indique un désaccord complet. L'ensemble des résultats de cette approche est indiqué dans le tableau 5.

L'analyse du tableau 5 montre que toutes les méthodes présentent un intéressant niveau de colinéarité reflétant directement une relation linéaire entre les valeurs observées, c'est-à-dire non interpolées, et les valeurs prédites (R^2 est très proche de 1.0). Cela montre que ces méthodes fonctionnent correctement lors de l'interpolation des données topographiques et ne génèrent pas de très grandes erreurs, mais ce qui les différencie c'est leur niveau de précision altimétrique (ce qui est confirmé par le coefficient d'efficacité E). Les valeurs des paramètres absolus (RMSE et EMA) sont clairement les plus faibles pour le krigeage par points, tandis qu'elles sont les plus élevées pour l'inverse distance et le polynôme local. Il est

également constaté que le voisin naturel présente des résultats proches de ceux du krigeage par point. Ces deux dernières méthodes s'adaptent bien aux données topographiques testées.

L'important avantage du krigeage réside dans sa capacité à fournir la meilleure estimation linéaire possible. Il fournit également une variance d'estimation qui est fonction de la continuité spatiale, telle qu'exprimée par le "variogramme" et de la configuration (c'est-à-dire la quantité et la répartition) de l'information disponible, ce qui peut être déduit de l'analyse de la carte des densités (Figure 4).

Il est également démontré que chaque phénomène géologique possède un variogramme qui lui est propre et que généralement la topographie présente un variogramme très continu, ce qui est constaté dans l'étude (Figure 7).

De ce fait lors de l'interpolation par krigeage, on applique un variogramme de type linéaire lorsqu'il s'agit des données topographiques. Ceci a été également démontré par les travaux de Hamrah *et al.* (2006).

Enfin, la figure 8 qui est issue de l'exploitation graphique du tableau 4 résume bien le comportement de chaque méthode utilisée avec les données topographiques. Principalement l'inverse distance présente une sous-estimation au niveau des valeurs inférieures à 100 m et à 150 m et une sur-estimation à partir de 300 m sauf pour le krigeage par point où cette surestimation est la plus faible. Pour des valeurs inférieures à 200 m, la courbure minimale, le voisin naturel et le krigeage par point sont presque confondus avec la courbe de l'interpolation exacte.

Généralement, la plupart des interpolateurs présente des déficiences d'estimation des valeurs prédites principalement au niveau des zones où les altitudes changent brusquement sous l'effet d'un relief accidenté présentant des valeurs élevées de pendage. Le krigeage par point, combiné à un variogramme de type linéaire, semble être la méthode la plus adaptée.

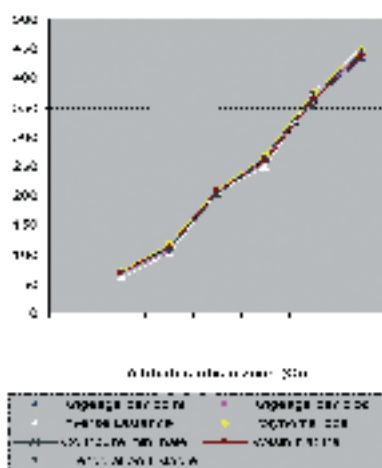


Figure 8 : Comparaison graphique entre les valeurs interpolées issues de différentes techniques utilisées avec celles des données observées.

Conclusions

Plusieurs conclusions, remarques et paramètres découlent de cette étude dont les plus importantes sont :

- la topographie du relief présente des paramètres qui peuvent influencer le résultat de l'interpolation surtout au niveau de la distribution de la densité des valeurs altimétriques ;
- une densité élevée n'implique pas forcément un bon résultat d'interpolation puisque certaines méthodes comme la courbure minimale et le polynôme local fonctionnent mal dans les zones où la densité est élevée ;
- les particularités géomorphologiques influencent considérablement la marge d'erreur de l'interpolation ;
- l'ensemble des interpolateurs montre qu'il existe une relation linéaire entre les valeurs observées et celles interpolées ;
- il est clair que les méthodes testées ne produisent pas les mêmes résultats et qu'une interprétation visuelle comparative des MNT ne le permet pas ;
- le polynôme local, la courbure minimale et l'inverse distance ne sont pas de bons interpolateurs pour les données topographiques ;
- grâce à ses propriétés variographiques le krigeage par point produit le meilleur modèle de la réalité géomorphologique du terrain avec une

	n	O _m	P _m	RMSE	EMA	R ²	E	d
Inverse Distance	6	236,67	241,00	15.74	13.85	0.9991	0.96	0.92
Courbure minimale	6		243,79	10.59	7.36	0.9989	0.98	0.96
Voisin Naturel	6		242,09	8.31	6.32	0.9992	0.99	0.97
Polynôme local	6		248,62	14.51	12.09	0.9984	0.99	0.93
Krigeage par point	6		239,97	5.94	4.12	0.9998	0.99	0.98
Krigeage par bloc	6		241,15	9.53	7.64	0.9995	0.98	0.97

Tableau 5 : Etude statistique des échantillons de différentes méthodes d'interpolation. O_m et P_m sont respectivement les moyennes des valeurs observées et interpolées.

faible marge d'erreur surtout au niveau des zones à relief accentué (de 1 à 2 m) ;

- la marge d'erreur diminue considérablement lorsqu'on augmente la résolution de la grille ;
- le krigeage par point nécessite une densité élevée de données pour avoir un meilleur résultat ainsi qu'une faible marge d'erreur. Le temps de calcul est plus élevé avec cette méthode ;
- enfin, une méthode d'interpolation est bonne pour une situation spécifique et suivant le contexte logiciel (software) dans lequel elle est exécutée et appliquée.

Les résultats montrent que le krigeage ordinaire est la technique la plus fiable pour modéliser la réalité du terrain géologique. ●

Contacts

**Noamen REBAI, Tarek SLAMA
et Mohamed MONCEF TURKI**

FST, 02/UR/10-02: Dynamique des Bassins Sédimentaires, Paléoenvironnements et Structures Géologiques, Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, El Manar II, P.O. 2092. Campus Universitaire, Tunisie
noamenrebai@yahoo.com

Bibliographie

- Briggs I.C.** "Machine contouring using Minimum Curvature", Geophysics, vol. 39, 1974, 39-48.
- Collins F.C. - Bolstad P.V.** "A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation", Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, New Mexico, 21-25 janvier, 1996, Santa Barbara, California, CD-ROM.
- Cooper G.R.J.** "Gridding gravity data using an equivalent layer", Computers & Geosciences, vol. 26, 2000, 227-233.
- Creutin J.D. - Obled C.** "Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison", Water Resources Research, vol. 18, 1982, 413-431.
- Franke R.** "Scattered data interpolation: tests of some methods", Mathematics and Computation, vol. 38, 1980, 181-200.
- Gaspar J.L. - Goulart C. - Queiroz G. - Silveira D., Gomes A.** "Dynamic structure and data sets of a GIS database for geological risk in the Azores volcanic islands", Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 4, 2004, 233-242.
- Grohmann C.H.** "Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R", Computer and Geosciences, vol. 30, 2004, 1055-1067.

- ■ ■ **Hamrah M. - Shajae D. - Mosavi, A.** "Evaluation of DTM generation in Surfer 8.0", MapIndia, 2006, www.gisdevelopment.net
- Kneale P. - See L. - Smith A.** "Towards defining measures for neural network forecasting models", Proceeding of the 6th International Conference on Geocomputation, University of Queensland, 24-26 September 2001, Brisbane, Australia, 61-72.
- Lam N.S.** "Spatial interpolation methods: A review", American Cartography, vol. 10, 1983, 129-149.
- Laslett G.M. - McBratney A.B. - Pahl P.J. - Hutchinson M.F.** "Comparison of several spatial prediction methods for soil pH", Journal of Soil Science, vol. 38, 1987, 325-341.
- Legates D.R. - McCabe G.J.** "Evaluating the use of the "goodness-of-fit" measure in hydrologic and hydroclimatic model validation", Water Resources Research, vol. 35, 1999, 233-241.
- Matheron G.** "Principales of geostatistics", Economic Geology, vol. 58, 1963, 1246-1266.
- Matheron G.** *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris, Fascicule 5, 1970, p. 212.
- Mendonça C.A. - Silva J.B.C.** "Interpolation of potential field data by equivalent layer and minimum curvature: a comparative analysis", Geophysics, vol. 60, 1995, 399-407.
- Nash J.E. - Sutcliffe J.V.** "River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principals", Journal of Hydrology, vol. 10, 1970, 282-290.
- Phillips D.L. - Dolph J. - Marks D.** "A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain", Agriculture and Forest Meteorology, vol. 58, 1992, 119-141.
- Rhind D.** "A skeletal overview of spatial interpolation techniques", Computer Applications, vol. 2, n° 3/4, 1975, 293-309.
- Sarközy F.** "GIS functions - Interpolation", Periodica Polytechnica

Civil Engineerings, vol. 43, n° 1, 1999, 63-86.

Sibson R. "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation, Interpreting Multivariate Data", John Wiley and Sons, Barnett editor, New York, 1981, 21-36.

Smith W. H. F. - Wessel P. "Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension", Geophysics, vol. 55, n° 3, 1990, 293-305.

Stein A. - Hoogerwerf M. - Bouma J. "Use of soil map delineations to improve kriging of point data on moisture deficit", Geoderma, vol. 43, 1988, 163-177.

Stein A. - Bouma J. - Kroonenberg S.B. - Cobben S. "Sequential sampling to measure the infiltration rate within relatively homogeneous soil units", Catena, vol. 16, 1989, 91-100.

Tabios G.Q. - Salas J.D. "A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation", Water Resources Bulletin, vol. 21, 1985, 365-380.

Willmott C.J. "On the validation of models", Physical Geography, vol. 2, 1981, 148-194.

ABSTRACT

Keywords: DEM, GIS, interpolation, statistical analysis, topographic data.

The main Strength of geographic information system (GIS) is found in the spatial information analysis. These latter inquires the spatial continuity parameter and a regular gridded surface that can be performed only by interpolation procedure.

This paper presents a quantitative approach to evaluate six interpolation methods used in DEM production from vector topographic data into GIS environment.

Different statistical parameters are used and analyzed to assess these methods and to determine the best one(s). Our results show that ordinary kriging performing better overall in the field of geological terrain modeling.

Journées de la Topographie de Strasbourg 2006 Remise des prix AFT 2005 - Erratum



Dans le précédent numéro d'XYZ (n°109 p22) la légende faisait défaut.

On peut reconnaître sur cette photo :

De gauche à droite Alain Gaudet (OGE), André Bailly (AFT), Sébastien Vera (2^e du prix AFT), Pauline Lucas (2^e du prix AFT), Alexander Hoffmann-Blodau (Topcon) et Pierre Grussenmeyer (AFT).

Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique *partie 1/4*

■ Paul COURBON



L'AFT est heureuse de diffuser l'essai de Paul Courbon qui retrace l'évolution exponentielle des matériels topographiques pendant les cinquante dernières années. Sa contribution sera publiée en quatre parties dans les numéros d'XYZ de 2007. Le recueil complet de son remarquable travail sera ensuite disponible dans les publications de l'AFT.

En guise d'introduction

*Il faut aux vérités de la science de belles histoires
pour que les hommes s'y attachent.*

Denis Guedj, les cheveux de Bérénice

La jeunesse est tournée vers l'avenir et plus rarement vers le passé. Ce n'est bien souvent qu'avec l'âge que l'on s'intéresse à ce qui s'est fait avant nous, quand un avenir beaucoup plus réduit nous incite à nous pencher sur un passé plus riche qui devient tout à coup passionnant!

Après avoir cessé mon activité professionnelle, j'ai enfin pris le temps de lire des ouvrages tels que *"Sciences géographiques dans l'Antiquité"* de Raymond d'Hollander ou *"Mesurer la terre"* de J.J. Levallois. Le premier ouvrage nous laisse admiratifs envers les savants de l'antiquité, lesquels n'avaient ni nos acquis de connaissances, ni nos moyens de travail et d'investigation, mais seulement leur sens de l'observation, leur réflexion et leur capacité à analyser les phénomènes observés. Dans le second, nous sommes encore admiratifs envers Picard, les Cassini, Delambre, Méchain, mais aussi les savants qui allèrent mesurer un arc de méridien au Pérou et en Finlande, à une époque où les transports étaient une véritable aventure. Nous revivons leurs discussions, leurs réflexions, parfois leurs disputes et l'ampleur des problèmes rencontrés. Si l'Illiade et l'Odyssée n'avaient déjà été écrites, la relation de ces aventures scientifiques les aurait largement supplantées !

Cependant, à ma connaissance, personne ne s'était lancé dans la description détaillée d'une autre histoire, plus récente, moins aventureuse et pourtant très dense : l'explosion des techniques topographiques. C'était un vide à combler, avant d'attendre que le temps ne rende ce comblement de plus en plus difficile. Le sujet s'avéra vite plus complexe qu'il ne paraissait car cette explosion est liée à celle de l'électronique et de l'informatique dont le topographe n'est pas un spécialiste. De plus, quand on est en activité, on ne note pas les dates. On vit l'apparition de toutes les nouvelles techniques, parfois avec retard et sans poser de questions. Trente ou quarante ans après, les lacunes se sont accumulées et la tâche devient singulièrement compliquée. Ceci, d'autant plus que les publications n'avaient pas à l'époque la fréquence et la qualité des publications actuelles rendues beaucoup plus aisées par le traitement de texte, les logiciels de mise en page et l'informatisation de la reprographie.

Quand on fait des recherches, de nombreux documents manquent de clarté, car de nombreuses inventions ou avancées technologiques étaient en gestation depuis longtemps. Il y a souvent confusion entre la conception d'un prototype non opérationnel et sa production industrielle. Il y a aussi une période d'inertie entre la première mise en vente d'un produit et le moment où ce produit commence à être connu et adopté par un grand nombre d'utilisateurs. Aussi, les dates recueillies ne sont-elles pas toujours nettes et les lignes qui suivent seront parfois incomplètes ou comporteront des erreurs inévitables. C'est pourquoi je préfère les intituler "essai". Je remercie par avance ceux qui me feront part de mes oublis et inexactitudes.

Je dois ajouter que, bien qu'ayant effectué de nombreuses missions à l'étranger, j'ai travaillé essentiellement avec des sociétés françaises ou avec l'IGN. Je me réfère donc principalement à la France en ce qui concerne mon expérience et mes souvenirs professionnels.

Il faut aussi analyser le but de ce travail. Il n'est pas de réécrire un cours sur toutes les techniques abordées, des ouvrages détaillés existent ou sont censés exister. Censés exister, car les ouvrages pédagogiques ont toujours un temps de retard par rapport à l'éclosion d'une technique! Cependant, il est certain qu'un historique de l'évolution topographique nécessite un minimum de rappels techniques. Il y a là un exercice très difficile qui consiste à faire une synthèse correcte de ce qui a été écrit, tout en restant accessible au plus grand nombre de lecteurs. C'est l'exercice périlleux de la vulgarisation qui amènera toujours des critiques concernant telle ou telle simplification jugée parfois excessive par les spécialistes.

Dans un premier temps, j'avais écrit un projet d'article comportant 17 pages de texte hors illustration. J'en mesurais les lacunes, ainsi que les erreurs qu'il devait contenir. Mais, c'était une "amorce" et je le proposais à l'Association Française de Topographie (AFT) pour publication. L'article fut jugé très intéressant, car c'était le premier du genre, mais ses lacunes et erreurs furent vite relevées et on me proposa de l'étoffer et de rechercher la coopération de spécialistes en vue de faire une publication plus volumineuse qu'un simple article. Je remercie chaleureusement l'Association pour l'intérêt qu'elle a apporté à mon travail.

Recherche de la documentation

Quand on habite à Toulon, loin des grandes écoles de topographie, la recherche de documentation est difficile. Il m'a fallu de nombreux appels téléphoniques, messages électroniques, courriers et des voyages rapides à Champs-sur-Marne, Paris, Strasbourg.

Par Internet, on peut aussi avoir de très nombreuses informations et avoir accès à plusieurs musées virtuels. Mais, la logique dans la recherche n'est pas toujours... logique !

De plus, les informations des musées virtuels sont souvent brutes et en vrac, sans explications ou commentaires. Elles comportent des incohérences de dates entre les différents musées ou informateurs. Aussi, il faut faire un tri et des recoupements.

Bibliographie

LEVALLOIS J.J. - Boucher C. - Bourgoïn J. - Comolet-Tirman A. - Robertou A. 1988 - *Mesurer la terre, 300 ans de géodésie française*, AFT.

D'HOLLANDER Raymond 2002 - *Sciences géographiques dans l'antiquité*, AFT.



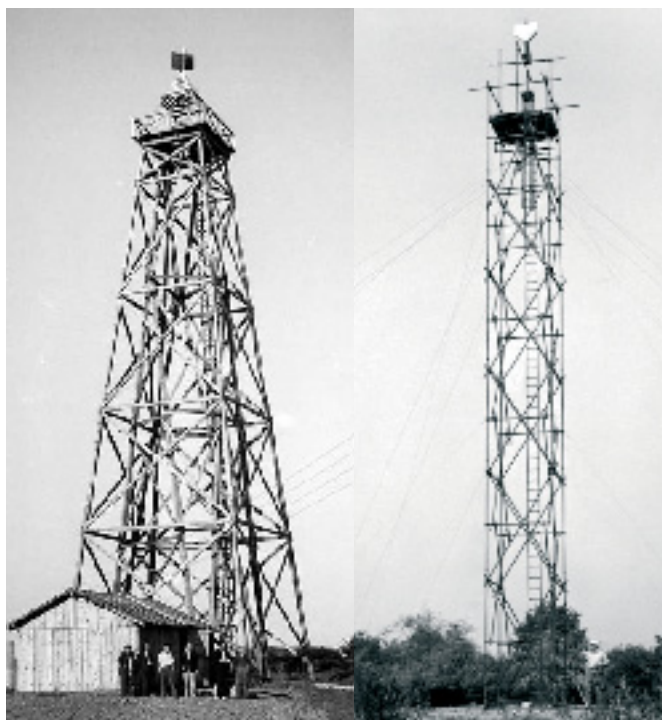
Etat des lieux en 1960

J'ai fait partie de ceux qui ont vécu la grande explosion technologique après avoir appris à travailler et commencé leur profession en utilisant des méthodes qui avaient peu évolué depuis plus de deux siècles. En 1950, la seule grande avancée technique depuis le XVIII^e siècle était le lever photogrammétrique à partir des photographies aériennes. A un degré moindre, il fallait y ajouter la conservation du temps lors des déterminations astronomiques et les liaisons radio permettant d'avoir l'heure de Greenwich au moment du pointé des étoiles. Mais, le principe de base restait le même. Quand on regarde la fermeture des triangles observés par Delambre et Méchain dans la décennie 1790, on s'aperçoit que la précision des mesures angulaires avait peu varié, seule l'ergonomie des appareils s'était améliorée, rendant les observations angulaires beaucoup plus rapides et faciles. Il faut toutefois noter l'amélioration énorme de la précision des mesure de base apportée plus tard par le fil invar. Lors de mes deux ans à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), de 1956 à 1958, nous avons fait beaucoup de levés à la planchette qui avaient occupé plus de la moitié de nos dix mois de travaux de terrain ; l'autre petite moitié avait été consacrée à la stéréopréparation des levés photogrammétriques, la géodésie et l'astronomie de position. Comme du temps de Picard, au XVII^e siècle, c'était encore le règne de la triangulation et nous avons fait une mesure de base au fil invar sur la crête sub-horizontale du Petit Lubéron où nous avons aussi monté une tour d'observation de vingt mètres de haut. Tous les calculs se faisaient aux machines manuelles Facit ou Vaucanson et le gros problème était celui de l'interpolation non linéaire des tables de valeurs naturelles ou des catalogues des étoiles. Des séances de calculs se faisaient



© IGN - droits réservés

Photographie montrant un tripode Raguette, utilisé en géodésie, monté dans la cour du Service Géographique de l'Armée, 136 rue de Grenelle, avant la création de l'IGN. ■ ■ ■



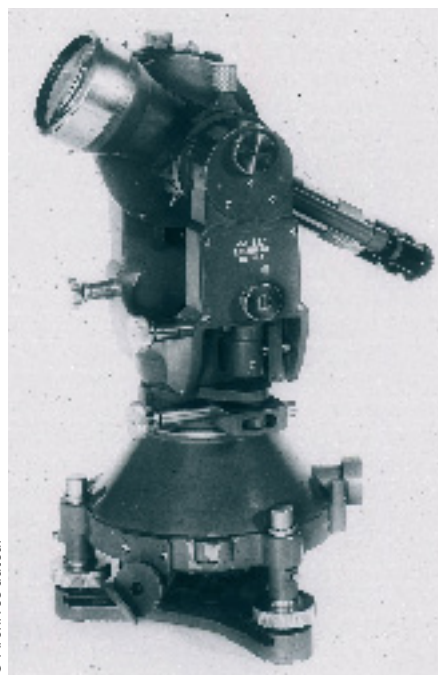
Deux tours géodésiques sur lesquelles étaient montés les théodolites en terrain plat et boisé. Le géomètre qui passait plus tard sur la borne pour se rattacher en Lambert, mais qui n'avait plus que son "petit trépied" de 1,6 m de haut, avait souvent des problèmes d'orientation !



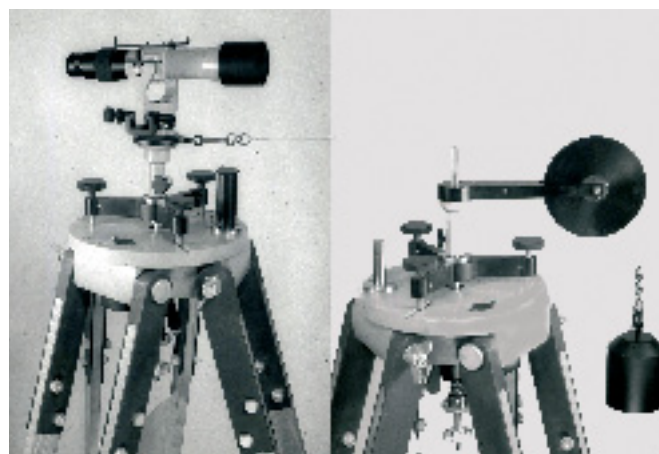
Installation d'une plateforme en haut d'un clocher. C'était du grand art qui permit à une génération d'échafaudiers d'exprimer ses talents et de géodésiens d'affronter le vertige.



Pose d'une borne du 1^{er} ou 2^e ordre. D'un poids de 200 kg ou plus, leur pose demandait un treuil. Celles du 4^e ordre pesaient entre 50 et 80 kg. En montagne, on préférait sceller des repères et des plaques !



Le summum en théodolite : le Wild T3 employé pour la triangulation géodésique française. Mais, principalement à cause des erreurs d'excentricité et de graduation du limbe on faisait jusqu'à 2 séries de 8 ou 16 réitérations en fonction de l'ordre du réseau.



Le fil invar, d'une longueur de 24 mètres et qui permet, malgré l'amplification des bases, d'avoir une précision inférieure à 10^{-5} sur le réseau géodésique français. A gauche, la lunette qui servait à l'alignement, à droite, le poids tenseur qui annulait l'erreur de chaînette.

aussi avec les tables de logarithmes. Dans les imprimés de calcul, nous retrouvons encore la méthode de Delambre, imaginée près de deux siècles auparavant. Les calculs de moindres carrés se faisaient avec les fastidieux tableaux de Doolittle. Au cours des levés de détail, les longueurs des polygonales étaient "chaînées" au double décimètre et au fil à plomb ; quant aux points de détail, la mesure de leurs distances était stadimétrique et tous les calculs de dénivellation, de réduction à l'horizontale, se faisaient avec une règle à calcul. Evidemment, l'intégralité des observations et résultats était notée à la main, sur des feuilles ou carnets d'observations.

En 1961, au retour du service militaire en Algérie, notre première mission de terrain avait consisté en quatre mois de lever direct 1 : 20.000 à la planchette sur les feuilles de Castelnauudary en vue de remplacer la vieille carte 1 : 80.000. Début 1962 avait suivi une autre mission (la dernière du genre) de lever direct 1 : 40.000 à la planchette à l'ouest de



Signal léger de la géodésie de 4° ordre au dessus de sa borne.



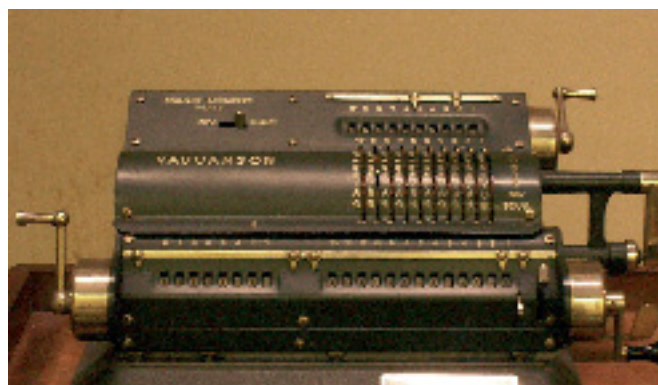
Un monument : l'une des 50.000 bornes de la NTF qui équipaient le territoire français. Avec le RBF et le GPS en réseau permanent, ce type de borne va bientôt faire partie du patrimoine historique...

l'Oued Moulouya pour la carte 1 : 50.000 du Maroc. Ces levers à la planchette devaient nous amener à une parfaite interprétation ou critique des courbes et de la planimétrie lors de la vérification des planches brutes issues de la photogrammétrie. Il fallait travailler deux ans au service de la topographie avant d'espérer une autre affectation. A l'IGN, c'était le règne de la planchette !

En 1968, j'avais pris deux ans de disponibilité pour voir ce qui se faisait hors de l'IGN. J'avais travaillé chez des géomètres-experts où l'instrument roi était encore le tachéomètre Sanguet ou le tachéomètre TARI, avec mesure stadimétrique des distances. Quand un géomètre achetait un théodolite ou un tachéomètre, c'était pour toute sa vie professionnelle ! La mesure des longueurs de cheminement se faisait encore à la chaîne ou au double décamètre, les calculs de polygonaux à la table de logarithmes, les reports des points de détail rayonnés au rapporteur SYMPA sur une minute carroyée à la main...



La cheminée Kodak, en bordure du Bois de Vincennes. Elle a aujourd'hui disparu. C'était un point géodésique qui a servi aux relèvements ou à l'orientation des exercices de terrain pour des générations d'élèves de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques.



L'arme absolue du géodésien et du topomètre : la machine à calculer Vauvanson qui permettait d'avoir 13 chiffres significatifs. Elle nécessitait, hors la vigueur du poignet, beaucoup de patience lors des fastidieuses interpolations de tables !



© IGN - droits réservés

Le gros progrès de l'astronomie de position fut apporté par les liaisons radio permettant d'avoir les "top" de l'heure de Greenwich au moment du pointé des étoiles. Sur le terrain, pour l'équipement des cartes 1/200 000 africaines, était employé le fameux poste militaire américain ANGRC9 alimenté par la non moins fameuse "gégène", dynamo actionnée à la main.





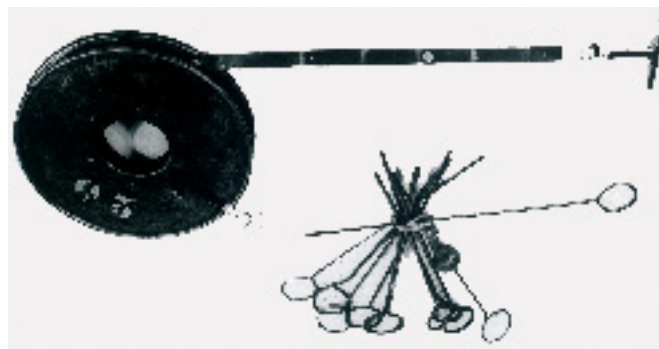
Travail à la planchette. L'alidade nivellatrice sert aux intersections et relèvements, l'éclimètre Puissant détermine les points avec distance stadimétrique, la règle à calcul permet les réductions à l'horizontale et le calcul des altitudes. Mesures et calculs sont notés sur le carnet. Pour la cartographie 1/20 000 et le dessin des courbes de niveau, l'examen stéréoscopique des photographies aériennes apportait une grande aide dans le travail.



Le tachéomètre Sanguet qui équipa de nombreux géomètres français. Le système de barrette latérale permettait un contrôle des mesures de distance et la réduction directe à l'horizontale.

- Le temps que les nouvelles techniques se généralisent et que leur coût devienne plus accessible, la véritable révolution n'arriva que vers 1982-1984 et encore, pas chez tous les géomètres français!

Le jeune "géomètre au bois dormant" qui aurait été piqué par une mouche tsé-tsé en 1968 et qui aurait été réveillé en 2003 par le tendre baiser d'une Laetitia Casta, aurait certainement été très surpris de retrouver ses camarades de promotion gri-



Ruban acier et fiches utilisé lors des mesures des cotés de polygonale. La cutellation permettait d'avoir les distances horizontales.

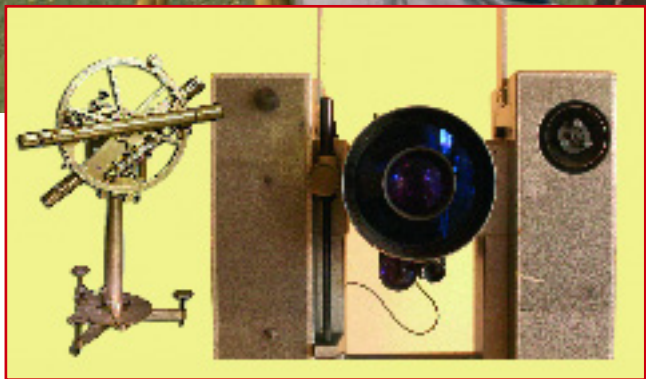
© Archives auteur

sonnants, chauves ou bedonnants ! Il aurait été encore bien plus surpris et complètement perdu en tentant de reprendre son activité professionnelle...

Les raisons de l'explosion technologique

En premier lieu il faut avancer l'essor de l'électronique accéléré par la deuxième guerre mondiale, avec l'invention du radar ou le décodage des messages secrets. Puis, dans les années qui suivirent la guerre, l'arrivée de l'informatique.

La deuxième guerre mondiale généra en outre l'emploi de fusées de plus en plus performantes avec lesquelles l'Allemagne voulaient réduire l'Angleterre à merci. A la fin de la guerre, les alliés "kidnappèrent" les savants allemands pour poursuivre ces recherches. Cela devait aboutir au lancement du premier satellite artificiel de la terre, le Spoutnik, réussi par les Russes le 4 octobre 1957. Moins de 4 mois plus tard, dans la nuit du 31 janvier au 1^{er} février 1958 le premier satellite américain, l'Explorer, était mis sur orbite par la fusée Juno 1. La France les imitait le 26 novembre 1965 avec la fusée Diamant A qui plaçait le satellite Astérix en orbite, préfigurant l'aventure d'Ariane. A première vue sans rapport avec la topographie, ces satellites préparaient l'avènement du GPS.



La première révolution : la mesure électronique des distances

Mesure de la distance à partir de la vitesse de propagation de la lumière, le Géodimètre

L'invention du radar pendant la seconde guerre mondiale amène indirectement la mesure électronique des distances en topométrie. Le suédois Erik Bergstrand est à l'origine de ce type de mesure. En 1947, il expérimente un prototype pour mesurer la vitesse de la lumière sur une base d'environ 8 km, correspondant à un côté de la géodésie suédoise. Il obtient un résultat de $299.793,1 \text{ km/s} \pm 0,25$ ce qui correspond à une précision relative de $0,8 \times 10^{-6}$.

Il est intéressant de rappeler la première détermination de la vitesse de la lumière imaginée par Hippolyte Fizeau en 1849. Ce dernier avait dirigé sur un miroir éloigné de 9 km environ, un pinceau lumineux à travers les 720 dents d'une roue en

rotation. Lorsque la roue avait atteint une certaine vitesse angulaire, le rayon lumineux réfléchi par le miroir était arrêté par les dents. La vitesse angulaire de la roue dentée étant mesurée, on pouvait déduire le temps mis par les dents pour obturer le faisceau réfléchi. La vitesse de la lumière était alors égale au quotient du double de la distance du miroir par ce temps. Fizeau trouva 313.290 km/s. Cette méthode illustre comment un savant ou un chercheur peut imaginer un moyen détourné qui lui permette d'obtenir la valeur d'une quantité sans la mesurer directement.

En 1947, le problème restait le même : le radar utilisait bien le temps mis par le temps aller-retour d'une onde, mais la précision de la mesure du temps était trop faible pour le but recherché par Bergstrand. Comme Fizeau il rechercha un moyen indirect, les procédés mécaniques du premier étant

■ ■ ■

■ ■ ■ remplacés par des techniques électro-optiques et électroniques. Fut alors explorée la méthode de mesure déduite du déphasage d'une longueur d'onde modulée. Suite aux travaux de Lebedew, Balakoff et Wafiadi en 1936, puis de ceux de Hüttel en 1940, Bergstrand utilise alors une cellule de Kerr reliée à un oscillateur de cristal, d'une fréquence de 10 Megahertz qui module l'onde lumineuse émise (onde porteuse). Il mesure la différence de phase entre l'onde modulée émise et celle réfléchie par un miroir et détectée par une cellule photoélectrique. Nous n'avons pas d'autres détails pour mieux expliquer la méthode de cette expérience.

■ Les débuts du Géodimètre

En 1948, Bergstrand pense que l'on peut inversement obtenir une distance en connaissant la vitesse de la lumière. La même année, il se rapproche du constructeur suédois AGA pour obtenir une assistance technique.

Comme précédemment, le Géodimètre imaginé par Bergstrand utilise une onde lumineuse modulée par une cellule de Kerr reliée à un oscillateur à quartz. On dirige des impulsions lumineuses de fréquence connue et d'intensité variable vers une station éloignée dont on recherche la distance. Après réflexion sur un miroir installé en cette station, on les reçoit dans un récepteur spécial placé juste à côté de l'émetteur. Là, ces impulsions lumineuses sont transformées en courant de faible intensité par une cellule photoélectrique. Lorsque la distance recherchée est une certaine fonction de la longueur d'onde des impulsions émises et réfléchies, la déviation d'un galvanomètre sensible devient nulle. On peut alors déterminer la distance à mesurer en fonction de la longueur d'onde des impulsions. Evidemment, dans le détail, la méthode comporte des dispositifs techniques beaucoup plus complexes, faisant appel entre autres à la polarisation de la lumière émise, mais leur description dépasserait le cadre du but historique de nos écrits et nous renvoyons nos lecteurs aux ouvrages de la bibliographie.

Il est intéressant de donner l'origine du mot "Geodimeter" devenu en français "Géodimètre". C'est l'abréviation de l'ap-

pellation anglaise "Geodetic distance meter".

Le prototype, d'un poids de 100 kg, nécessitait un générateur de 400W. Une mesure demandait 2 à 3 heures ! Ce temps fut ramené à une heure pour le premier Géodimètre commercialisé en 1953, puis à 20 minutes en 1958, sur le modèle 2A. Bergstrand utilisait deux modulations de l'onde porteuse, une de 10MHz ($\lambda = 30$ m) et une seconde déduite des oscillations d'un cristal auxiliaire et telle que : $101\lambda_1 = 100\lambda_2$. Ce rapport permettait de connaître le nombre de longueur d'ondes (ambiguïté) contenu dans la distance à 100 près, soit 3 km pour la distance aller-retour. Cette particularité nécessitait donc que l'on connaisse préalablement la longueur mesurée à 1,5 km près. La résolution des "ambiguïtés" en était à ses balbutiements, bien avant l'apparition du GPS !

■ Le développement du Géodimètre

Le premier modèle commercialisé (Model 1) fut testé en 1953 par l'Ordonance Survey anglais et par l'US Army Map Service qui fit l'acquisition de cinq des dix modèles vendus cette année là. L'appareil était utilisé la nuit avec une portée de l'ordre de 30 km. La précision obtenue sur les mesures de distances était de 1/300 000.

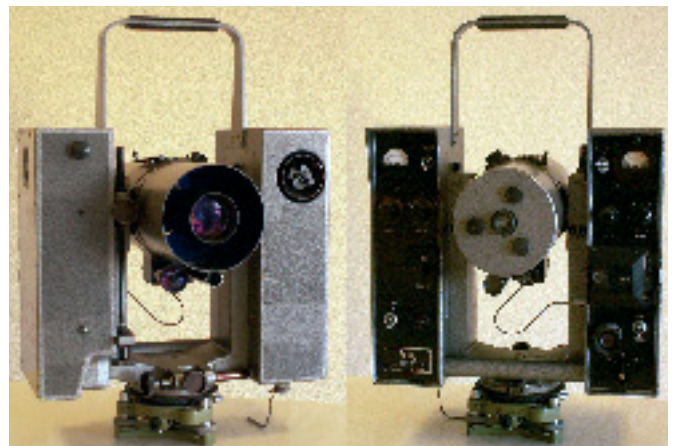
Le modèle 2 fut lancé en 1955. En 1957, 50 exemplaires avaient été vendus. Il comportait trois modulations de fréquence au lieu de deux. L'onde lumineuse visible produite par des lampes à vapeur de mercure, nécessitait une tension de 500V et permettait d'atteindre une portée de 50 km de nuit (2 km seulement le jour du fait du "bruit" trop fort de la lumière ambiante). Plus tard, en 1960, lors de l'implantation de caméras de suivi des fusées à Cape Canaveral, avec quelques modifications apportées par les américains, une précision de 1/1 200 000 fut obtenue. A la même époque, le constructeur donnait comme précision $5\text{mm} \pm 1\text{mm/km}$, ce qui était extraordinaire. Il était évidemment nécessaire de faire les corrections en fonction de la pression de l'air et de la température sèche.

Fin 1958 apparaît le Geodimeter Modèle 4A. Ce "petit appareil", d'un poids de 17 kg sans la batterie, fonctionnait avec une bat-



© Archives auteur

Le Géodimètre Modèle 3, un monument.



Le Géodimètre modèle 6 vu devant et derrière. C'est le premier modèle à optique de réception et d'émission coaxiale.

terie de 12 volts. Il avait une portée allant de 15 mètres à 5 km. Pour ces courtes distances, les lampes à vapeur de tungstène remplaçaient celles à vapeur de mercure. C'est le premier appareil conçu pour un usage de topométrie et non de géodésie. Bien qu'encore élevé, son prix le rendait accessible à des topographes indépendants, il fut surtout employé aux Etats-Unis. Le modèle 4B, peu différent, apparut au printemps 1959.

En 1964 apparaît le modèle 6, le premier à utiliser des transistors, une lampe à vapeur de tungstène et, pour la première fois, une optique émetteur-récepteur co-axiale. Fonctionnant sur batterie de 12V, il pesait 17 kg. Il avait une portée de 2 à 3 km de jour et de 15 km la nuit. Il offrait la possibilité de remplacer la lampe à vapeur de tungstène par une lampe à vapeur de mercure. Cette dernière lampe valait un quart du prix du distancemètre et nécessitait, en outre, de remplacer la batterie par un générateur capable de produire un voltage beaucoup plus élevé.

A partir de 1967, AGA délocalise une partie de sa production aux USA, où les Géodimètres sont montés dans le New Jersey avec des composants suédois. C'est ainsi, qu'en 1968, apparaît le modèle 8 utilisé pour mesurer des chaînes géodésiques à travers le pays. C'est le premier modèle à remplacer le rayon lumineux par un rayon laser. Par ailleurs, des modèles dérivés du modèle 4, tels le 4D et le 4Ds, équipés soit de lampe à vapeur de mercure, soit d'un laser, permirent d'obtenir des performances très intéressantes : avec le modèle 4L, une portée de 21 km de jour et de 42 km de nuit pouvait être atteinte.

Dans les modèles 6A et 8, changement important dans les modulations de fréquence, il y avait quatre phases f_1, f_2, f_3, f_4 proches les unes des autres et telles que :

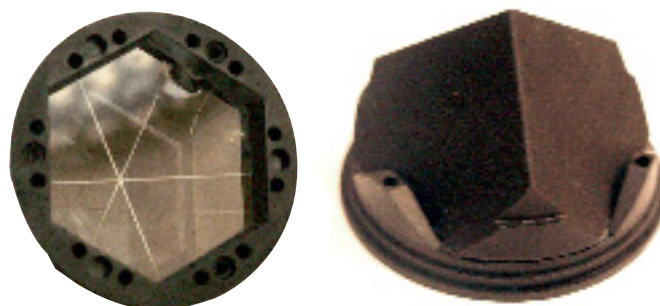
$$f_2 = f_1 + f_1/400, \quad f_3 = f_1 + f_1/20, \quad f_4 = f_3 + f_1/10000 \text{ ou } f_4 = f_1 + f_1/20 + f_1/10000$$

Par différences de phases, à la manière d'un vernier, on pouvait déterminer ainsi l'ambiguïté du nombre entier de phases contenues dans la distance mesurée. Cette méthode est aussi appelée "hétérodyne".

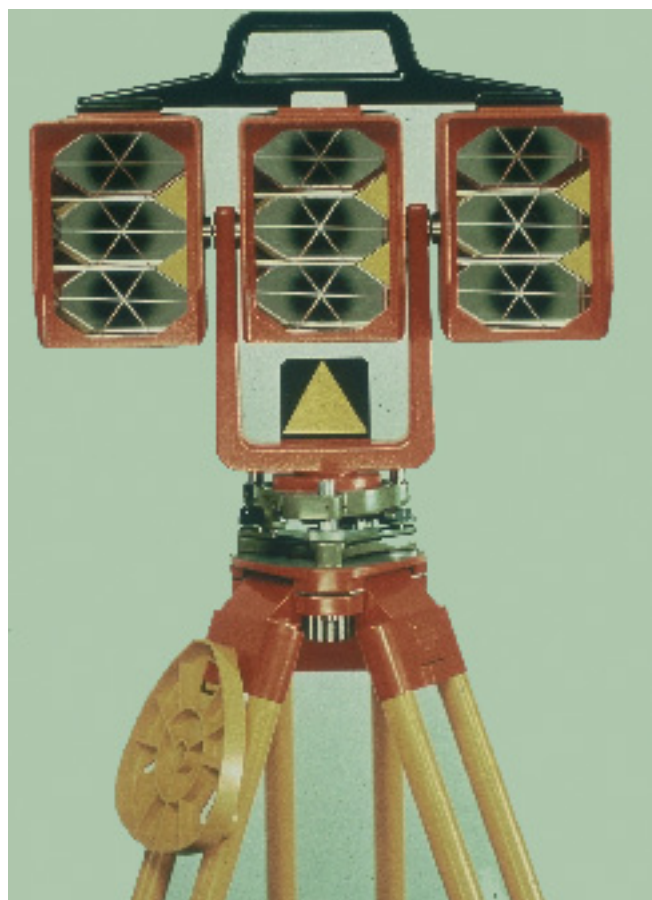
En 1972 est produit le modèle 76 développé pour les besoins du marché américain. Ce modèle qui préfigure les distancemètres modernes, a un système de lecture automatique, évitant le changement manuel des modulations de fréquence (automatic read-out).

■ Les réflecteurs

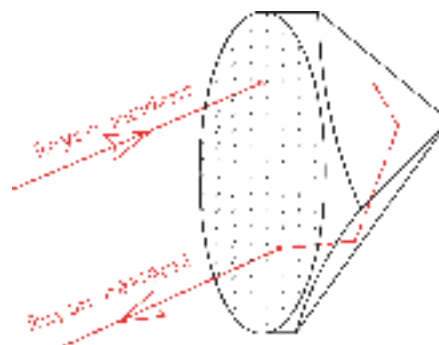
Dans mes recherches, j'ai constaté le même type d'oubli que celui commis par de nombreux auteurs qui se sont attachés à la géodésie au XVIII^e siècle. Dans cette histoire de la géodésie, ils nous décrivent tous les instruments de mesure angulaire, mais ignorent la nature des points visés : avec les lunettes de l'époque, comment matérialisait-on une cible située à 30 kilomètres ou plus ? Seuls les vrais géodésiens ont pensé à ce détail ! Ici, même type d'oubli. Comment étaient les premiers réflecteurs ? Les mesures historiques de 1947 ou 48 furent faites sur un miroir plan, ce qui supposait bien des problèmes



un prisme "coin de cube" ou rhomboédrique vu devant et derrière.



Batterie de 9 prismes pour mesures lointaines.



Après réflexion sur ses trois faces, le prisme rhomboédrique ou en coin de cube, renvoie le rayon dans la même direction, quelque soit l'incidence de ce rayon sur le prisme.

■ ■ ■ pour l'orientation correcte du dit miroir. Peu après on utilisa aussi un réflecteur sphérique qui devait être orienté à mieux que 30 minutes.

En fait, le premier réflecteur prismatique aurait été utilisé pour la première fois par l'US Army Map Service, en 1953. Cependant, le plus ancien document que j'ai vu représentant une batterie de trois "prismes coin de cubes" ou prismes rhomboédriques, date de 1961 ; il accompagne la photo d'un Géodimètre Modèle 4. Pouvons-nous en déduire que les prismes en coin de cube se sont généralisés avec le Modèle 4, fin 1958 ou début 1959 ? De 1966 à 1970, lors des travaux effectués par l'IGN sur le 12^e parallèle, il en fallait jusqu'à 27 en fonction de la distance mesurée 15 à 20 km.



Les Telluromètres MRA1 et 2. Sur le MRA2 on voit l'antenne nécessaire à la propagation des ondes radio. Sur les deux, on voit le petit écran cathodique où se forme le cercle coupé qui permet de déterminer la distance.

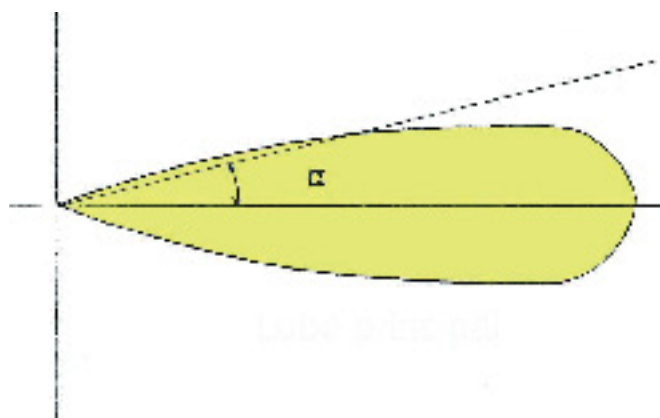
Mesure de la distance par différence de phase d'une onde électromagnétique (microwave), le Telluromètre

L'emploi des ondes électromagnétiques pour mesurer des distances avait déjà été suggéré par le physicien Nikola Tesla dès 1889. Le premier prototype d'un distancemètre de ce type fut construit en 1926 par Schegolew, Boruschko et Viller à Leningrad.

Mais, ce sont les sud-africains, avec T.L. Wadley, qui développèrent ce principe à partir de 1954. Ils réalisèrent le premier modèle commercial avec le Telluromètre MRA1, construit au Cap et présenté en 1957. D'autres modèles suivirent, tels le MRA2 ou le MRA 101.

L'onde lumineuse était remplacée par une onde électromagnétique. Pour obtenir une propagation en ligne droite, réduire le lobe d'émission et ainsi limiter les réflexions parasites, sans pour autant mettre en œuvre une source de grande dimension, il apparaissait qu'il fallait utiliser des ondes porteuses d'ordre centimétrique d'une fréquence de 3 à 30 GHz. Cependant, la nature de l'onde électromagnétique crée des problèmes différents de ceux de l'onde lumineuse. Une antenne est nécessaire pour établir un "couplage" entre l'appareil et l'atmosphère. De plus, même en employant des ondes centimétriques, le phénomène de diffraction empêche de réduire l'angle du faisceau émis autant qu'on le voudrait. Cette grande ouverture du faisceau émis entraîne une perte énorme de la puissance du faisceau réfléchi ainsi que des réflexions parasites. De ce fait, le Telluromètre comportait deux appareils : un émetteur appelé "maître" et un réémetteur synchrone en direction de l'émetteur appelé "répondre", qui renvoyait l'onde émise par le maître en amplifiant son intensité.

Un procédé assez complexe mixait les ondes porteuses de longueur centimétrique F émises par le maître et les ondes de fréquence peu différente F' émises par le répondeur pour en déduire une fréquence ΔF stable et ajustable employée dans



Le lobe principal émis par une onde électromagnétique n'a pas la finesse d'une onde lumineuse, son angle au sommet α peut atteindre 7°. La large surface couverte diminue trop l'intensité de l'onde retour, ce qui nécessite un "répondre" actif.

le procédé de mesures. Mais, principe de tous les distance-mètres, la mesure des distances correspondait à une mesure de différence de phase de l'onde entre le moment de son émission par le "maître" et le moment de son retour après réémission par le "répondeur". Par calcul, cette différence de phase était convertie en longueur.

Cependant, la précision de résolution du phasemètre ne permettait pas d'utiliser une seule modulation de l'onde porteuse. Aussi, par l'intermédiaire d'un oscillateur, plusieurs modulations différentes de cette onde porteuse étaient émises successivement et couvraient plusieurs plages de longueurs.

Sur le CA 1000, les fréquences ainsi modulées avaient des sous-multiples de 10, 100, 1000, 10.000 (méthode hétérodyne). A titre d'exemple, les observations sur ce Telluromètre apparu en mars 1972, comportaient 5 séries de mesures, avec pour chaque série une modulation différente de l'onde porteuse effectuée au "maître" et au "répondeur". On obtenait successivement, après multiplication par un coefficient propre à l'appareil, les dizaines de kilomètres, les kilomètres, les centaines de mètres, les dizaines de mètres, les mètres avec leurs deux décimales. Ces changements de modulation par les oscillateurs étaient manuels. Grâce à une liaison phonique en duplex entre l'opérateur du maître et celui du répondeur, ils étaient faits de manière concertée. Cette liaison phonique était obtenue par une modulation BF superposée aux autres. Les cinq séries de mesures étaient commandées par l'opérateur du "maître", elles demandaient que l'on déplace successivement un bouton aux cinq positions A, B, C, D, E qui correspondaient à cinq modulations différentes de l'oscillateur. Il faut ajouter que le CA1000, modèle ultra-léger peut être considéré comme le premier distancemètre à micro ondes "portable".

Suivant les types d'appareils et leur année de construction, on pouvait avoir deux postes symétriques, donc interchangeables dans leur rôle, ce qui permettait de faire la mesure dans les deux sens et d'améliorer la précision.

Les mesures de distances étaient complétées par des mesures de pression et de température (température sèche et humide pour les ondes radio). Sur de longues distances, les corrections étaient importantes. Les portées pouvaient atteindre entre 30 et 50 km, la précision était inférieure à 10^{-5} (1 à 2cm ± 2 mm/km), mais n'atteignait pas le 10^{-6} du Géodimètre.

Emploi des Géodimètres et des Telluromètres

Les Telluromètres, comme les Géodimètres à lampe de vapeurs de mercure, furent exclusivement employés pour des travaux de type géodésique ou des polygonaux de précision de longs cotés. L'IGN expérimenta les Telluromètres dès le début pour mesurer plusieurs cotés géodésiques de la région parisienne puis en 1959-60 pour accélérer les travaux géodésiques du Sahara, enfin en 1966 lors des travaux sur le 12^e parallèle où il furent associés au Géodimètre plus précis. Il faut cependant noter qu'au bout de la chaîne de mesure du parallèle, il avait très peu de différence entre la longueur totale



© Ph. J. C. Leblanc



Le Telluromètre CA 1000 apparu en 1972. Ici, un maître et un répondeur. On voit en haut deux types d'antenne en forme de porte-voix. Pas d'écran pour

l'affichage des mesures. Celles-ci sont faites en cinq sessions en réglant le bouton de gauche sur A, B, C, D, E. Le voyant chiffré de 1 à 10 et les autres boutons, permettait d'obtenir les deux chiffres significatifs des mesures BCDE et les trois chiffres de la mesure A.

Sur la feuille d'observation de 1981, on voit les 5 mesures d'appoint faites avec la fréquence A et leur moyenne. Les deux colonnes en quinconce en dessous correspondent aux observations du maître et du répondeur qui se contrôlent. Le résultat de ces cinq mesures est multiplié par 3 pour avoir les distances en mètres. A droite, les températures sèches, humides et la pression relevées au maître et au répondeur en début et fin d'observation. La mesure d'une distance et des paramètres demandait de un quart d'heure à une demi heure.

© Photo transmise par Jorg Duedal



Le Distomat DI 50 de Wild qui portait à 150 km !

- ■ ■ déduite des mesures au Telluromètre et de celle déduite des mesures au Géodimètre.

Wild se lança dans cette technique en 1962 avec le Distomat DI 50 donné pour une portée de 50 m à 150 km et une précision de $2\text{cm} \pm 1\text{ppm}$. Siemens aussi produisit un distancemètre de ce type que j'ai utilisé en Jordanie en 1980, il avait une portée de 100 km !

Les distancemètres à onde infrarouge

Pour obtenir une propagation en ligne droite, obtenir un lobe d'émission étroit et ainsi éviter les réflexions parasites, sans pour autant mettre en œuvre une source de grande dimension, il apparaissait que les ondes lumineuses, de l'ordre du micron apportaient un gros avantage par rapport aux ondes électromagnétiques. Les distancemètres à onde infrarouge, associés à des prismes en coin de cube, sont arrivés avec les diodes à l'arséniure de gallium, à partir de 1965, sur les prototypes du Telluromètre MA 100, et la série Wild qui lance le DI 8 coproduit avec Sercel en 1968.

Ils simplifiaient l'emploi du Géodimètre et du Telluromètre, mais avec des portées moins grandes. Au début, ils n'étaient employés qu'en topométrie pour la mesure des polygones ; mais, plus petits que les précédents distancemètres, ils pouvaient être fixés sur la lunette d'un théodolite (DI 8 sur T2) et préfiguraient l'emploi des distancemètres électroniques dans la topographie courante et dans les levés de détail. Il fallut attendre 1970-71 pour voir ZEISS innover avec le SM11 incorporé à un tachéomètre (voir chapitre sur les stations totales). Ce distancemètre utilisait deux fréquences de 15 MHz et 150 KHz permettant de couvrir le kilomètre et les sous-multiples de 10 m.



Le Citation, appareil de fin de série, montable sur la lunette d'un théodolite. Je l'avais acheté en 1982 pour une mission en Arabie, alors que j'étais free-lance.

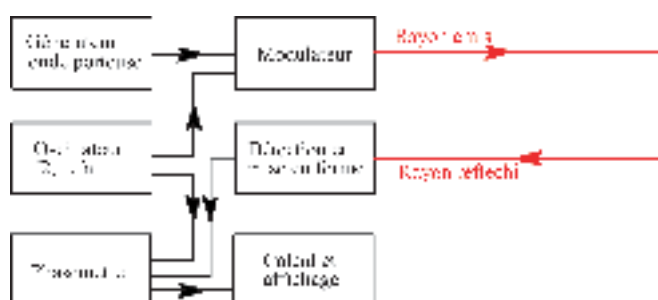


Le distancemètre DI 10. Utilisable seul ou sur la lunette d'un T2 (voir infra dans le paragraphe L'association au théodolite). Avec ses deux optiques

d'émission et de réception, ses deux câbles sur le côté, il fait penser à un monstrueux insecte ! Il était complété par un gros coffret au sol contenant toute l'électronique.



le Geodimeter 14A, produit dans les années 1970 non adaptable à un théodolite. Le volume reste important et il y a toujours deux optiques non coaxiales pour l'émission et la réception du rayon IR. Les distances sont affichées sur LED.



Principe des ondes modulées. L'oscillateur fournit successivement au modulateur plusieurs fréquences bien calibrées qui vont moduler l'onde porteuse émise vers le prisme. L'oscillateur envoie en même temps les ondes modulées au phasemètre qui va les comparer à celles reçues après réflexion sur le prisme. Les fréquences calibrées envoyées par l'oscillateur couvrent différentes plages de longueur destinées à convertir le déphasage en distance et à résoudre l'ambiguïté.

Les ondes porteuses infrarouges, modulées pour le besoin des mesures à une fréquence beaucoup plus basse, alliaient les qualités d'une propagation à très haute fréquence avec les qualités métriques d'une fréquence permettant une électronique de conception facile. Comme vu précédemment avec le Telluromètre, il fallait plusieurs trains d'ondes modulées avec une fréquence différente pour déterminer les différentes gammes de longueur. Mais ici, ce changement était fait automatiquement (automatic read-out), le "générateur d'onde porteuse" et le "modulateur" étant alors confondus sur un seul composant de taille modeste. Les systèmes électroniques et le calcul étant plus lents qu'aujourd'hui, une mesure demandait parfois 10 à 20 secondes contre une seconde actuellement. Sur le Citation, par exemple, on entendait le battement tic-tac des différents cycles de la mesure.

■ Les phasemètres numériques

Il faut signaler que l'apparition de ces phasemètres a changé le principe de mesure à partir du milieu des années 1980. Ils utilisent un trigger, circuit électronique courant qui crée une impulsion chaque fois que le signal qui lui est fourni passe par zéro avec une pente positive. Il devient alors possible, par un double comptage, de déterminer le nombre total des périodes entières générées pendant le temps de mesure et de résoudre l'ambiguïté (nombre de phases). Le phasemètre ne sert plus alors qu'à mesurer la portion de la période non entière. Le microprocesseur peut ainsi afficher un temps de propagation transformé en distance.

■ L'association au théodolite

Les progrès de l'électronique amenant une diminution de leur taille, la miniaturisation des distancemètres fut envisagée dès 1966, date à laquelle le français Sercel présentait un prototype destiné à être monté au dessus de la lunette d'un théodolite. Il s'associa avec Wild pour produire en 1968 le DI 10 dont l'émetteur-récepteur de rayons IR était montable sur la lunette du théodolite T2. Il était relié par un câble à un important coffret électronique situé à terre. La photographie d'époque laisse voir un engin qui, aujourd'hui, nous paraît monstrueux ! Il préfigurait l'emploi des distancemètres dans les levés de détail.

Comme vu dans le paragraphe précédent, il fut suivi, en 1970 par le SM11 de ZEISS dont les deux optiques d'émission et de réception coaxiales étaient intégrées à la lunette d'un tachéomètre du même nom. C'était une première révolutionnaire.

En 1973 Wild produisait le DI 3, plus petit que le DI 8 et dont le boîtier électronique était fixé entre la tête du trépied et le théodolite. Le DI 4 suivit en 1980 et surtout, en 1983, le DI 1000,



© Archives auteur

Le DI 10 monté sur un T2. C'est la première association "distancemètre-théodolite".

■ ■ ■ beaucoup plus discret, compact et adapté à la lunette du T2 ou du T 1000. Les stations totales faisaient leur apparition.

A cette époque, à part l'exception du SM 11 de ZEISS, l'optique d'émission et l'optique de réception des distancemètres était bien séparées, aussi possédaient-ils deux optiques distantes de quelques centimètres. Nous verrons plus loin, dans les stations totales, l'intégration des optiques d'émission et de réception intégrées dans la lunette du théodolite. Il faut noter que le Geodimètre Modèle 6, apparu en 1964 avait été le premier à utiliser une émission-réception co-axiale, mais, c'était un appareil réservé à l'usage géodésique et non au lever de détail.

J'ai surtout parlé de Wild qui avait une grosse part du marché français, mais tous les constructeurs (Kern, Aga, Zeiss en Europe) ont produit des distancemètres. Avant de disparaître de ce secteur, l'américain HP (série HP 3800) devint un important constructeur de ce type d'appareils. Suivant le modèle et le nombre de prismes, ils avaient une portée de 1 à 10 km, avec une précision après correction comprise entre 10^{-5} et 10^{-6} , en général $5\text{ mm} \pm 1$ à 2 mm par km, toujours après avoir mesuré pression et température sèche et calculé les corrections correspondantes.



Le DI 1000 distancemètre beaucoup plus compact des générations suivantes. Il n'y a plus de coffret électronique, la miniaturisation électronique et informatique a tout réduit dans un volume restreint. Un câble permettait d'enregistrer la mesure.

Les distancemètres laser

Les premiers distancemètres lasers ne furent pas employés en topographie. Une impulsion représentant une puissance instantanée gigantesque était envoyée sur une cible qui n'en renvoyait qu'une petite partie vers l'émetteur. La mesure de la distance était déduite de la mesure du temps de trajet aller-retour de l'onde. Des mesures sur les autres planètes ou sur les satellites artificiels furent d'abord effectuées. Mais ce type de mesures n'exigeait pas une précision comparable à celle de la topométrie.

En 1968, nous avons vu la première utilisation du laser sur les Géodimètres américains. Le site de Wild-Heerbrugg montre la photo du distancemètre laser T 20 fabriqué spécialement pour l'armée suisse en 1974 et monté sur théodolite.

Vers le milieu des années 1980, apparut la technique des "diodes laser pulsées" qui allait permettre la généralisation du laser dans la mesure des distances. La cadence de tir était de l'ordre de 10 000 par seconde et la puissance de crête inférieure à 1 watt. L'impulsion émise (dans la gamme infrarouge de $0.9\mu\text{m}$) suivait le même traitement optique que dans les télémètres à onde entretenue (voir paragraphe



Le Fennel 2000, distancemètre à rayon laser associable à un théodolite. Celui-ci, acheté en 1985 par mon prédécesseur était montable sur un tachéomètre Tari. Il mesurait avec prisme et avait une portée de 2000 m. Monté sur l'alidade et indépendant de la lunette, il devait être orienté sur le prisme après mesure des angles.



Petit distancemètre laser à main, dont le premier fut produit par Leica en 1993.

: les distancemètres à onde infrarouge). Une chronométrie d'une précision de 1 ns permettait d'avoir une précision de 15 cm sur la distance (30 cm sur l'aller-retour).

Mais du fait du grand nombre de mesures (10 000 par seconde), on pouvait espérer un écart-type 100 fois plus petit. Cependant, cette réalisation n'était pas simple et rendue possible que par plusieurs artifices techniques, telle l'utilisation de fibres optiques qui ralentissait la lumière pour que les échos ne se chevauchent pas. Vers 1985 Fennel, pionnier en la matière, produisait des distancemètres de ce genre à un prix très abordable. J'avais hérité de mon prédécesseur d'un FEN 2000 acheté en 1985 et montable sur tachéomètre, il avait une portée de 2000 m, une précision de 5 mm \pm 5 mm/km et prenait les points très vite. On peut citer aussi le WILD DI 3002, de surcroît plus précis (5 mm \pm 1 mm/km) et d'une portée de 6 km.



© Photo transmise par Jorg Duedal

Le DI 3000 série 2, produit par Wild, fait partie des distancemètres d'extrême précision. Il était montable sur T2.

Le fait d'utiliser la même optique à l'aller et au retour devait permettre plus tard de mesurer des distances sans prisme. Ce système ne fut employé sur les stations totales qu'en 1994 par Geotronics et en 1998 pour LEICA. Au début, les portées étaient de l'ordre de 30 mètres. C'était aussi le cas pour les petits distancemètres à main "Distomat" de Wild apparus en 1993. L'arrivée des sources laser à semi-conducteurs, permettant des longueurs d'onde plus élevées avec de plus fortes puissances a permis d'accroître cette distance à 2 ou 300 mètres pour certaines stations totales et à 1 km pour la lasergrammétrie (Voir dans un prochain numéro le paragraphe sur "les scanners lasers (ou lasergrammétrie)").

Les mesures d'extrême précision, le Mekomètre

Conçu par K.D. Froome et R.H. Bradsell, du National Physical Laboratory anglais à partir de 1961, le Mekomètre ME 3000 fut développé par Kern à partir de 1970. Adapté à la métrologie de grande précision, il permettait de mesurer les longueurs avec une précision fixe de 0,1mm et une précision proportionnelle de 1 mm/km. Il fut suivi par le DI 3000 de Wild, un peu moins précis, le GEOMENSOR ou en 1986 par le KERN ME 5000.

La technologie, assez complexe, utilisait la polarisation de la lumière émise qui, à la réception, donnait un minimum ou un maximum de lumière transmise en fonction du nombre entier ou non de longueur d'onde modulée.

Beaucoup plus récemment, LEICA a sorti le TCA 2003 dont le distancemètre peut avoir une précision de 0,5 mm à 120 mètres, due à un excellent calibrage et à un oscillateur à quartz très stable et précis, dont la dérive est inférieure à 1 mm/km par an.

Cette dérive nous rappelle que la précision demande des contrôles ! Les géomètres le font-ils de temps à autre, même sur des appareils moins précis ?

■ ■ ■



Le Telluromètre MRA 101. L'écran cathodique des MRA 1 et 2 a été remplacé par un cercle gradué.

■ ■ ■ La lecture des mesures

C'est un détail qu'il m'a paru intéressant de rappeler. En 1965, j'avais fait un exercice de mesures sur un Telluromètre MRA2 acheté par l'IGN vers 1960. Si l'électronique avait déjà généré les tubes cathodiques, l'informatique nécessaire aux calculs balbutiait encore. La lecture des résultats se faisait alors sur un petit écran cathodique de 8 à 10 cm de diamètre situé sur le maître et sur lequel se formait un cercle lumineux entouré de graduations (voir les photos des Telluromètres MRA1 et 2). L'onde retour créait une coupure sur ce cercle et l'on faisait plusieurs lectures sur les graduations pour une détermination. Quand on était au grand jour ou au soleil, le cercle lumineux n'était pas suffisamment visible. Il fallait alors appliquer contre l'écran l'ouverture d'un tube d'une vingtaine de centimètres de long qui l'isolait de la lumière et on collait l'œil de l'autre côté !

Sur le modèle MRA 101, il fallait tourner un cercle avec 100 graduations pour amener l'aiguille d'un cadran à son origine. La lecture sur ce cercle gradué permettait de déduire la longueur correspondant à la longueur d'onde utilisée. Il fallut attendre les progrès de l'informatique pour pouvoir afficher directement ces résultats. Tout d'abord sur des tambours chiffrés, comme ceux des compteurs kilométriques des voitures, puis, après 1971 sur les diode électroluminescentes LED (Light Emission Diod) et deux ou trois ans plus tard sur des écrans de cristaux liquides.

Les distancemètres en 2005

Le distancemètre électronique a marqué le début de la révolution topographique. Pour l'histoire, les deux premiers Géodimètres achetés en France par des géomètres privés, le furent en 1963. Le cadastre ne les ayant pas encore testés, l'un

de ces géomètres n'eut pas l'autorisation d'employer cet appareil dans les marchés cadastraux !

Mais le temps a passé, les mentalités ont changé et nous sommes arrivés à la fin d'un cycle. Aujourd'hui, l'arrivée du GPS a exclu le distancemètre de tous les travaux de canevas topographique: plus de triangulation ou trilatération, plus de stéréopréparation, plus de grande polygonale de précision en vue d'équiper une zone à topographier.

Mais, il compense ce délaissement dans d'autres domaines: incorporé aux stations totales il est utilisé dans les levés de détail et architecturaux, dans les implantations, auscultations, topographie industrielle, etc. Les petits distancemètres à main sont largement employés en architecture et dans le bâtiment.

Bibliographie

CLENDINNING J. 1952 *"The Geodimeter: an instrument for the accurate measurement of distance by high frequency light variations"*, Empire Survey Review n°85, 11, pp. 290-301 et 363-371. (Traduit en juin 1953 par l'IG Thuillier pour un fascicule IGN)

AUSTIN C. POLING 1959 *Geodimeter manual* (Washington D.C., rev. ed. 1961)

SAASTOMAINEN JJ. 1967 *Surveyor's guide to electromagnetic distance measurement*, University of Toronto

IGN-5^e Direction 1970 *Mesure de la vitesse des ondes centimétrique ou lumineuse*

BURNSIDE C.D. 1971 *Electromagnetic Distance Measurement*, Granada publishing-London

TOMLINSON R.W. 1971, *American congress on surveying and mapping*

KASSER Michel 1985 et 1991 *Appareils électroniques de mesure de distance*, publication IGN

RUEGER J.M. 1990 *Electronic Distance Measurement*, Springer-Verlag, Berlin

FONDELLI M. 1991 *Manuale di topografia*, Editori Laterza-Roma

DEUMLICH F. STAIGER R. 2002 *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*, 9^e édition, Wichmann à Heidelberg

Site Internet:

americanhistory.si.edu/collections/surveying/object

Suite dans le numéro 111 d'XYZ:

LES INSTRUMENTS DE MESURE:

Les théodolites électroniques ou stations totales
Autres instruments de mesures ou de lever

Gestion d'ouvrage architectural : de la saisie photogrammétrique à l'interface 3D d'accès aux données patrimoniales

■ Emmanuel ALBY - Elise MEYER - Pierre GRUSSENMEYER - Mauro RAMPAZZO

La création d'une interface tridimensionnelle de gestion du Lycée des Pontonniers de Strasbourg a nécessité trois étapes. La première correspond à une documentation complète par photogrammétrie multi-image dans Photomodeler. Elle est suivie d'une phase de définition et de qualification de la géométrie dans Sketchup et AutoCAD avec les données mesurées afin d'obtenir un modèle dans le format VRML. Le modèle a ensuite été intégré dans une base de données, avec toutes les autres données à disposition dans le projet. Le résultat permet un accès rapide et ergonomique par le modèle 3D visualisé dans une interface web.

■ mots-clés

Architecture, modélisation, patrimoine, orthophotos, support décisionnel, modèle 3D sur Internet

Par la mise en application de la loi de décentralisation du 2 mars 1982, la région Alsace administre 77 lycées dont le patrimoine est géré par la direction des services techniques. L'intendance de ce patrimoine vaste et hétérogène (bâtiments neufs, anciens, avec des fonctions diverses) entraîne la mise en place de méthodes de gestion et de suivi des opérations garantissant la connaissance du patrimoine immobilier et des équipements, de son état, de la gestion des demandes et des interventions. Un projet visant la mise à disposition d'outils informatiques a été lancé en 2005 pour atteindre ces objectifs. Il s'agissait, dans un premier temps, de constituer la documentation des ouvrages, de l'organiser (dans une armoire à plans numériques pour les projections classiques de la représentation de l'architecture). Ensuite, ces éléments ont dû être complétés avec une base de données métier permettant l'intégration de données issues de considérations patrimoniales à partir de l'existant. Dans la continuité, il est prévu, à partir de 2007, de se doter d'une plateforme logicielle permettant d'intégrer les informations de type gra-

phique et alphanumérique et cela en couvrant les besoins relatifs à la gestion stratégique du patrimoine (gestion de la maintenance préventive, curative, des contrats de maintenance et d'entretien, gestion des opérations, par exemple). C'est pour mettre en place cette expérimentation qu'une collaboration entre les services techniques de la région Alsace et le laboratoire MAP-PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique) de l'INSA de Strasbourg a été mise en place.

Collaboration entre un laboratoire de recherche et les services techniques de la région Alsace

■ Problématiques complémentaires

Le rapprochement des services techniques de la région et du MAP-PAGE est facilité par des problématiques complémentaires : d'un côté la nécessité de gérer des bâtiments particuliers de la façon la plus efficace, et de l'autre, des moyens techniques et méthodologiques pour la documentation relative aux ouvrages architecturaux.

■ Gestion d'ouvrage

La diversité des documents relatifs à un établissement représente déjà un problème à résoudre pour permettre une optimisation des documents nécessaires. Mais cette situation se répète autant de fois qu'il y a de sites à gérer. Les documents nécessaires à la gestion des ouvrages sont de différents types et représentent une grande quantité d'informations à manipuler, lorsque plusieurs ouvrages sont entretenus. L'efficacité se manifeste aussi bien dans la qualité des documents que dans la facilité à les manipuler. Cette ergonomie doit donc se plier à la diversité rencontrée à savoir projections planes, document écrits, images par exemple.

■ Documentation sur les ouvrages

Les problèmes rencontrés pour l'utilisation de la documentation sont présents aussi au moment de sa création.

L'équipe MAP-PAGE, dans son domaine de compétence, est à même de fournir des éléments de documentation dimensionnelle d'ouvrage architectural. Basée sur les techniques topographiques de

■■■ mesure, ses activités sont axées autour de la mesure photogrammétrique et lasergrammétrique. La quantité de données nécessaires à la documentation dimensionnelle d'un ouvrage bâti varie en fonction du niveau de détail auquel on veut aboutir lors de la création des représentations. Plus le niveau de détail est élevé, plus le volume de données augmente. Le mode de production des données est différent selon la technique employée ; il dépend aussi de la pertinence recherchée. En photogrammétrie, les données peuvent être produites manuellement. Ainsi l'opérateur peut choisir les points de l'objet qu'il veut connaître dimensionnellement.

Le type de document qu'il est possible de fournir est très varié. A partir des données, peuvent être créés des plans, des ortho-images, des modèles tridimensionnels.

L'acquisition de données sur un ouvrage bâti associée aux connaissances architecturales permet d'aboutir à la création d'un modèle 3D. Cette grande quantité de données produites pendant l'acquisition doit être organisée, d'une part dans le modèle mais aussi de telle sorte que les images restent, par exemple, accessibles pour des interprétations ultérieures.

■ Le projet

Le lycée des Pontonniers est situé en plein centre ville, au bord du canal des faux remparts à Strasbourg. Les bâtiments principaux, dont la conception architecturale des bâtiments est pour le moins originale, furent achevés en 1902. L'aspect général de l'ensemble est assez pittoresque. L'établissement est aujourd'hui "Lycée international". Des bâtiments ont été ajoutés à partir des années 60 pour adapter le lycée aux exigences pédagogiques et pour augmenter sa capacité d'accueil. Le site du lycée international se compose de plusieurs bâtiments qui constituent 6 unités fonctionnelles. La situation particulière du site et les caractéristiques architecturales de certains bâtiments impliquent un traitement attentif et particulier, notamment dans le cadre de toute



Figure 1. Les bâtiments et la configuration du lycée des Pontonniers. Vue aérienne, chambre Rolleï DB44 métrique, pixel au sol de 16 cm.

intervention à l'extérieur et à l'intérieur de ceux-ci.

Depuis le 1^{er} janvier 2005, la Région Alsace assure la gestion du lycée international des Pontonniers en tant que maître d'ouvrage et propriétaire. Afin de connaître avec précision l'état du patrimoine bâti, il a été décidé de réaliser une campagne de diagnostics et de relevés visant à auditer en détail les installations en vue d'une mise en sécurité des bâtiments avec remise aux normes et d'une restructuration globale ultérieure.

■ Besoins

Du point de vue de la gestion des lycées, il est possible d'envisager les diagnostics précités à partir de relevés basés sur des plans ainsi que sur des photos, ces dernières étant utilisés, notamment pour mettre en évidence les éléments présentant des dégradations et sur lesquels des interventions ultérieures seraient envisageables. L'intérêt d'intégrer les techniques de photogrammétrie dans cette opération de diagnostic est perceptible pour plusieurs raisons. Le but est de disposer d'une base de connaissance précise au niveau de l'ensemble des éléments du

clos et du couvert afin d'envisager dans les meilleures conditions les opérations de maintenance tout en respectant les éléments du bâti ayant une valeur particulière sur le plan historique et architectural.

Il s'agit de saisir l'opportunité offerte par le modèle tridimensionnel sur le plan de la maintenance et de la gestion du patrimoine. En effet, cet outil peut permettre de localiser dans son contexte et de visualiser des éléments du bâti pour en apprécier l'état et envisager de la manière la plus pertinente des interventions ponctuelles ou à plus large échelle. La liaison avec une base de données décrivant le référentiel patrimonial pour cet établissement a été prévue pour faciliter la recherche d'informations telles que des plans, des photos de détail et de type alphanumérique en association avec la base de données. Dans ce sens, la maquette tridimensionnelle agit en quelque sorte comme un assistant pour l'accès aux informations de la base de données.

Il est à noter que dans le déroulement du projet des orthophotos sont à réaliser dans un premier temps pour permettre aux intervenants du lot "diagnostics" de mener à bien leur mission.

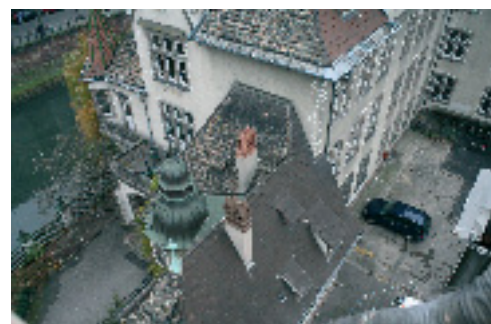


Figure 2. Prises de vue à partir du sol, d'un bâtiment et de la nacelle

L'application doit pouvoir répondre à des questions que pose la gestion des lycées. L'outil proposé doit s'intégrer aux problématiques d'application de la réglementation en vigueur (amiante, plomb, sécurité incendie, chaufferie, électricité, accessibilité, ...) mais également aider la pérennisation du patrimoine et notamment la maintenance générale des toitures et des façades. Cette expérimentation a aussi un rôle d'évaluation des potentiels d'un tel projet étendu à la maintenance complète de l'ensemble des lycées que gèrent les services techniques de la région Alsace.

Après avoir décrit les besoins liés à cette expérimentation, nous allons présenter le cheminement en trois étapes suivi par la production de l'interface tridimensionnelle de gestion d'ouvrage architectural.

Documentation

■ Photogrammétrie

L'acquisition des données dimensionnelles nécessaires au dimensionnement des modèles des bâtiments du lycée des Pontonniers a été réalisée par photogrammétrie. Pour des raisons de souplesse d'usage, la technique photogrammétrie multi-image a été choisie. Deux appareils de photographie numérique ont été utilisés pour cela, le Canon EOS 5D (capteur de 4368 x 2912 pixels, 12 millions de pixels) équipé d'un objectif calibré de 28 mm de focale et le Rollei D507 (capteur de 2552 x 1920 pixels, 5 millions de pixels) équipé d'un objectif calibré de 7 mm de focale. Les prises de vues ont été réalisées depuis le sol, dans un premier temps. Des

points de vue en hauteur ont pu être réalisés à partir des étages des bâtiments ayant vue sur d'autres. Des manques de données causés par la restriction aux points de vue accessibles ont été comblés par des prises de vue effectuées sur des nacelles utilisées par les entreprises chargées d'effectuer un diagnostic sur l'état des toitures des bâtiments.

Le traitement des données photogrammétriques a été réalisé avec le logiciel PhotoModeler 5 (EOS system). Pour permettre la mise à l'échelle et l'insertion dans le repère absolu, les points d'appui ont été mesurés par tachéométrie électronique. Toutes les photos nécessaires au dimensionnement ont ensuite été orientées. Les coordonnées des points pertinents ont ainsi été mesurées dans un même système de référence. Les projets ont, dans un premier temps été réalisés par groupement de bâtiments de manière à ce que les points de vue soient convergents puis, une fois les projets respectifs consolidés par les points d'appui, certains ont été fusionnés pour faciliter le traitement des données (Grussenmeyer et al., 2002). De cinq sous-projets au départ, on arrive à deux projets résultant de ces fusions.

Une des particularités de ce projet était dans un premier temps, de fournir des orthophotos avant de fournir les modèles finaux, la base commune aux orthophotos et aux modèles étant l'orientation des images dans PhotoModeler. Les orthophotos devaient être réalisées pour un usage équivalent à des élévations de bâtiments. Elles ont été utilisées par les intervenants dans le diagnostic de l'état

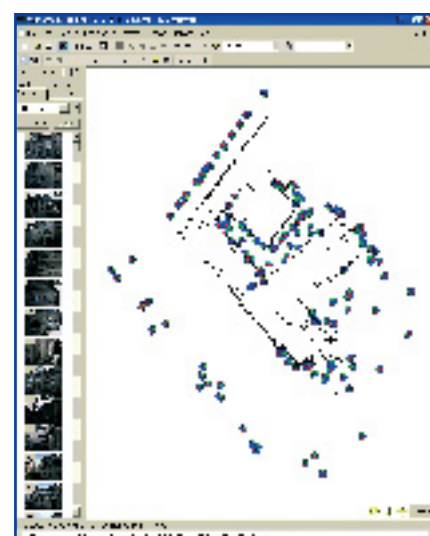


Figure 3. Fusion des projets Photomodeler pour les bâtiments C, D, E et F.

des éléments extérieurs. L'intérêt des orthophotos par rapport aux élévations (informations de type vectoriel) pour cet usage a été de fournir d'une part, des informations plus détaillées et d'autre part, directement interprétables pour le diagnostic. Les orthophotos sont extraites des photos originales utilisées pour la modélisation. Une orthophoto correspond à une division du bâtiment selon la logique des façades. Les photos, dont elles sont tirées, dépendent d'une part, des caractéristiques du capteur photographique et d'autre part, des conditions de recul par rapport aux bâtiments. Ces deux logiques d'acquisition et de représentation sont différentes, ce qui oblige de regrouper plusieurs images originales redressées afin d'obtenir une seule ortho-image. De plus, les façades sont composées de plusieurs plans différents: la rectification des images les

■ ■ ■ représentant a donc augmenté le nombre de composantes des orthophotos finales. Une orthophoto est donc une mosaïque d'images multiples. Un élément d'environnement particulier aux bâtiments du lycée des Pontonniers a compliqué considérablement cette tâche : des arbres sont plantés à proximité d'une grande partie des façades. La multiplicité des points de vue permettait de réduire les masques sur les orthophotos. Des ajustements radiométriques ont dû être réalisés entre les différentes images pour uniformiser le résultat final.

Pour permettre un usage équivalent à des élévations, les orthophotos ont ensuite été importées dans le logiciel AutoCAD afin de permettre aux différents prestataires d'intégrer (par "digitalisation") dans des couches spécifiques les données relatives à leur expertise. Les orthophotos étant à l'échelle, elles permettent de mesurer directement des éléments ou de tracer des zones de dégradation par exemple pour les diagnostics dont les prestataires peuvent alors calculer la surface dans l'interface d'AutoCAD.

Modélisation

La modélisation d'ouvrage bâti correspond à la construction d'une représentation tridimensionnelle du bâtiment en utilisant l'analogie forme/géométrie. Il convient, dans un premier temps, de déterminer les informations qui peuvent être contenues dans le modèle géométrique pour ensuite décrire les éléments que l'on veut modéliser et finalement définir le moyen de les ordonner.

La notion de géométrie est liée à deux concepts interdépendants : la relation entre les éléments qui composent le modèle et leurs dimensions respectives. Dans le contexte de l'acquisition dimensionnelle, on mesure la position de l'objet dans l'espace et ce avec une occurrence qui dépend de la méthode d'investigation relative à la technique d'acquisition utilisée. La conséquence de cette approche de modélisation basée exclusivement sur les moyens de



Orthophoto finale

Images
redressées à
partir des
prises de vue



Figure 4. Orthophoto basée sur les images redressées

positionnement de l'objet architectural est que "ce qui n'est pas mesuré n'est pas modélisé". L'acquisition dimensionnelle ne permet pas de mesurer la totalité d'un ouvrage bâti dans les conditions normales de relevé du fait des principes optiques utilisés. La géométrie d'un modèle tridimensionnel construit de cette façon n'est donc pas complète et révèle des manques. L'approche relationnelle de la géométrie vise à définir les éléments qui com-

posent le modèle les uns par rapport aux autres. Les dimensions effectives de ces éléments sont déduites des relations mises en place entre eux. Il ne s'agit pas ici des dimensions absolues, mais des dimensions dépendantes de l'échelle propre au modèle. Celui-ci construit de façon relationnelle est cohérent, car il dépend de la définition que l'on a faite des éléments et non pas de la faculté d'un appareil à en définir la position. La mise en relation d'éléments

géométriques nécessite par contre la mise en place de règles. Celle-ci sont établies en fonction d'hypothèses concernant l'objet à modéliser. On utilise les connaissances architecturales pour déduire ces règles constitutives des ouvrages bâtis. Elles peuvent être simples comme la division par niveaux ou plus élaborées si on les met en relation avec le niveau de détail des représentations : quelles simplifications peuvent être effectuées et quels éléments à faire figurer pour que le modèle soit fidèle aux caractéristiques du bâtiment ?

Le type d'objet est le résultat de la mise en œuvre de plusieurs domaines de connaissance tels que la composition architecturale, la construction et les matériaux par exemple. Ces connaissances sont consignées dans les informations de type architectural qui peuvent se diviser en deux types pour ce projet : les informations analytiques et la documentation écrite. Les informations analytiques sont le résultat d'une investigation méthodique. Le bâtiment, une fois terminé contient des connaissances encapsulées et recouvrables par l'analyse. Cette enquête est une recherche de logique de conception. C'est un travail de traduction des principes de composition que la façade révèle. Il consiste en une décomposition raisonnée de la partie extérieure de l'ouvrage. Celle-ci peut être thématique : analyse de la volumétrie (niveaux et corps de bâtiments), étude stylistique ou étude structurelle par exemple. En revanche, la documentation écrite est composée d'éléments qui regroupent de façon exhaustive les éléments d'une thématique. Il peut s'agir de traités, de méthodes, de glossaires, d'index par exemple. Pour cette étude il a été principalement utilisé deux ouvrages : "Principes d'analyse scientifique : architecture" (Pérouse de Montclos, 1993) et le Dicobat (Vigan, 1992). Le premier est une méthode de description du patrimoine architectural : On y trouve le vocabulaire lié aux éléments d'architecture ainsi que les illustrations associées. Ce livre est une synthèse des connaissances relatives au patrimoine architectural. Le second élé-

ment est un dictionnaire de l'architecture utilisé par les architectes contemporains : il consigne le vocabulaire architectural courant. Son utilisation dans le cadre de ce projet est liée à la continuité des connaissances architecturales au fil du temps. Il n'y a pas de rupture dans la tradition constructive. Les termes employés il y a quelques siècles pour nommer certains éléments le sont encore aujourd'hui. C'est pourquoi ce dictionnaire est très utile.

La définition du modèle à réaliser est donc basée sur la combinaison des informations dimensionnelles et architecturales. Pour parvenir à la construction d'un modèle géométrique cohérent d'un ouvrage architectural, on utilise les informations architecturales, d'une part, et les données dimensionnelles d'autre part. Ces deux types d'informations sont complémentaires : leur combinaison vise à combler les manques que l'usage exclusif de chacune provoque. Le lieu de la combinaison se situe dans l'imbrication des deux caractéristiques de la géométrie énoncée plus haut. Les connaissances architecturales, aussi bien analytiques qu'écrites, permettent la mise en place des éléments du modèle géométrique. Les connaissances architecturales sont un guide, une aide à l'élaboration du modèle. L'approche théorique que peut laisser présumer l'apport de la documentation générale est compensée par le pragmatisme de l'analyse raisonnée de l'ouvrage. Le modèle obtenu est, dans un premier temps certes, sans échelle, mais fidèle par sa forme et sa complétude à l'original. L'intégration des données dimensionnelles se fait, une fois le modèle défini à l'aide des connaissances architecturales. On utilise les éléments de géométrie définis pour segmenter les données à disposition. Le modèle complet mais sans dimension sert ainsi de cahier des charges vis-à-vis des données dimensionnelles (pour orienter le processus de relevé). L'intégration des données peut être perçue comme une qualification d'un modèle.

La combinaison des deux types différents d'information permet d'obtenir le

modèle cohérent et dimensionné. La combinaison se met en place en deux étapes successives, définition et mise en relation des éléments, puis dimensionnement de ceux-ci.

Le projet de modélisation de l'ensemble des bâtiments du lycée des Pontonniers tient sa complexité dans la multiplicité et la diversité des ouvrages. Le groupe de bâtiments composant le lycée est divisé en six unités. Cette partition est réalisée en fonction des affectations des ouvrages plus que des corps de bâtiments. Les ouvrages datent de différentes époques allant du XV^e siècle jusqu'aux années 1980. Cette différence d'époques influe sur la complexité de chacun d'eux. Les différents ouvrages n'ont pas les mêmes gabarits. Un élément de complexité supplémentaire réside dans la relation des ouvrages entre eux.

Le niveau de détail de la modélisation est défini par l'usage qui est fait du modèle. Sa destination est l'interface du système de gestion de documents. On doit pouvoir reconnaître chaque ouvrage et visualiser les caractéristiques formelles des façades. Il doit être rendu possible de cliquer sur des entités architecturales significatives en relation avec les niveaux internes et les décrochements externes. On peut déjà en déduire que les entités cliquables ne feront pas plus d'un étage de hauteur, et seront délimitées horizontalement par les décrochements verticaux de l'ouvrage.

■ Modélisation à base d'orthophotos

Une des particularités de ce projet de modélisation porte sur le préalable de la phase de production d'orthophotos décrite ci-dessus. Celles-ci sont équivalentes à des élévations classiques et permettent, de ce fait, de récupérer des informations sur les caractéristiques de chaque façade. Elles ont donc été utilisées comme point de départ au modèle. L'intégration de ces orthophotos s'est révélée intéressante pour la prise en compte du modèle final les textures pour le modèle tridimensionnel créé. Le niveau de détail visé pour

■■■

■ ■ ■ la géométrie n'étant pas très important, l'intégration des textures ajoute une pertinence au modèle par les détails visibles sur les images. La combinaison du modèle géométrique et des textures permet d'obtenir au final une représentation fidèle aux édifices, d'autant plus que certains d'entre eux sont très ouvragés.

■ Modélisation préalable au dimensionnement

La phase de modélisation géométrique doit permettre la création de modèles Virtual Reality Modelling Language (VRML) texturés. L'apport des orthophotos conduit à leur intégration dès le début de la modélisation. Le logiciel a permis de définir le modèle est Sketchup. Ce dernier est destiné aux concepteurs, son interface rend possible la création de croquis tridimensionnels de façon très conviviale. L'option d'export en VRML permet son utilisation aisée pour le projet. L'importation des orthophotos permet la définition d'une forme globale dont les faces correspondent aux façades représentées par les dites orthophotos. Elles procurent aussi les informations pour la mise à l'échelle de la forme simple. On utilise ensuite les images pour diviser le modèle et en définir la forme définitive. On trace des lignes de découpe sur les faces et les positionne en avant ou en arrière de son plan. La mise en relation des faces est ici implicite du fait de l'utilisation des orthophotos pour la modélisation : la toiture est en haut de la façade par exemple. On procède simultanément à la division des façades en faces ayant une signification architecturale (hauteur d'un étage, décrochements verticaux...) qui au final seront cliquables dans l'interface Web.

Une fois la géométrie du modèle entièrement définie dans Sketchup, on procède à l'exportation vers le format VRML. L'intérêt du format VRML réside ici dans l'enregistrement des textures relativement aux faces. Pour qualifier le modèle du point de vue dimensionnel, on récupère la géométrie et on l'importe dans AutoCAD, où on la combine

avec les points 3D mesurés par photogrammétrie dans PhotoModeler et sur le terrain.

L'intégration des caractéristiques dimensionnelles se manifeste de deux manières différentes. Comme le modèle a été créé à partir d'orthophotos, les éléments géométriques mis en relation à partir de chacune d'elles ont des rapports de dimensions justes, le dimensionnement intervient donc dans la mise à l'échelle globale des façades ainsi que dans leur orientation relative.

Une fois les données tridimensionnelles intégrées, on fusionne la géométrie finale avec le fichier VRML contenant les textures. Le modèle est terminé, il reste à y intégrer les liens vers le contenu informatif.

Système de gestion

La documentation et la représentation des informations relatives à un ouvrage bâti représentent une grande quantité d'informations qu'il est nécessaire de répertorier et de conserver dans des bases de données. Pour pouvoir ensuite tirer profit de ces données mémorisées et les utiliser pour des besoins ultérieurs, telle la gestion de l'ouvrage, on crée alors un système d'information. Les données sont exploitables et peuvent aussi être enrichies par la suite. Les systèmes d'information que l'on rencontre actuellement sont pour la plupart des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Ils permettent la mise en relation de données géolocalisées. Le système d'information qui intéresse ici ne s'apparente pas entièrement aux SIG par le fait qu'il gère d'autres informations que des données spatiales, mais les principes sont transposables. Les qualités recherchées pour un tel système relèvent de l'efficacité, de la rapidité et de l'ergonomie dans la présentation des informations pour en permettre l'analyse. Il a été fait en sorte que les informations soient accessibles par l'intermédiaire de représentations tridimensionnelles de l'édifice. La représentation 3D sert d'interface d'accès aux

données. Celles-ci peuvent ainsi être consultées et modifiées par le biais du modèle 3D. Ce système est destiné à être utilisé par plusieurs personnes. Il a été développé selon la problématique des interfaces accessibles sur Internet. Cette problématique étant déjà présente dans les services techniques de la région Alsace, le projet a pu se greffer sur une base de données existante. Cette problématique d'accès aux données indépendamment de tout logiciel commercial et de manière simple et claire aussi bien pour la consultation que pour la modification, permettra de transposer simplement la technique utilisée pour les autres lycées de la région.

■ Implémentation du Système d'Information

D'un point de vue technique, notre système d'information se base sur un serveur Hypertext Preprocessor (PHP). L'utilisation d'un tel serveur implique la création de bases de données dans le Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) MySQL, et une interaction avec ces bases de données grâce à des programmes écrits dans le langage PHP. Le choix de ce système avait déjà été fait, aussi bien par la région qu'au laboratoire MAP-PAGE avant le début du projet. L'intégration des données dans la base de données de la Région (ajout de tables) a donc été très aisée. Tous les "logiciels" et plugins nécessaires sont en accès libre pour que le système puisse être accessible facilement de plusieurs endroits et que toutes les données soient rassemblées sur un serveur unique (Leukert & Reinhardt, 2000), (Drap et al., 2001).

La réalisation du modèle tridimensionnel du lycée est un préalable à toute opération comme nous l'avons expliqué précédemment. Chaque entité architecturale significative, en relation avec les niveaux intérieurs et les décrochements externes, entité que nous appellerons "face" par la suite, est identifiée et rendue interactive grâce à un système d'ancrage dans le fichier 3D au format VRML. Le VRML étant enregistré comme un fichier texte, le PHP

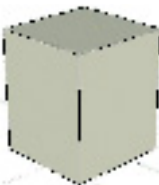
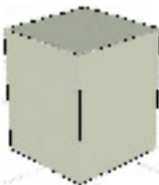








Bâtiment A	Bâtiment B	Etapes de modélisation
		Définition de la forme globale (une face correspond à une orthophoto à importer)
		Insertion des orthophotos et mise en correspondance entre elles
		Découpage des faces selon les orthophotos et définition des façades principales.
		Définition du niveau de détail voulu et des faces définitives du modèle.
		Importation des faces dans AutoCAD et mise à l'échelle en fonction des points issus de Photomodeler

Figure 5. Etapes de la modélisation (bâtiments A et B).

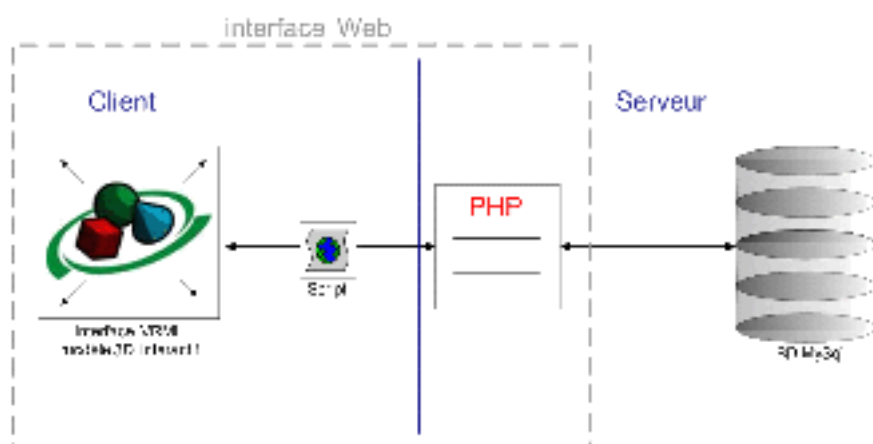


Figure 6. Fonctionnement informatique du système d'information (d'après Meyer et al., 2006)

Les informations dont il est question ici sont de type très divers. Elles comportent les caractéristiques des faces modélisées telles que le nom du bâtiment dont elle fait partie, le nom de l'étage concerné, par exemple ou bien de documents particuliers tels que l'orthophoto de la façade globale, les diagnostics réalisés par d'autres prestataires (sous forme de fichiers Word, Excel ou AutoCAD), les relevés topographiques effectués par un Géomètre-Expert. Ces informations sont soit enregistrées avec les faces correspondantes pour leurs caractéristiques, soit dans des tables séparées de la base et mises en relation.

■ Interface

Selon ce qui a été énoncé plus haut, le modèle s'affiche dans un navigateur Internet muni d'un plugin VRML (en l'occurrence Cortona de ParallelGraphics). La fenêtre principale contient le modèle tri-dimensionnel texturé. Ce modèle est

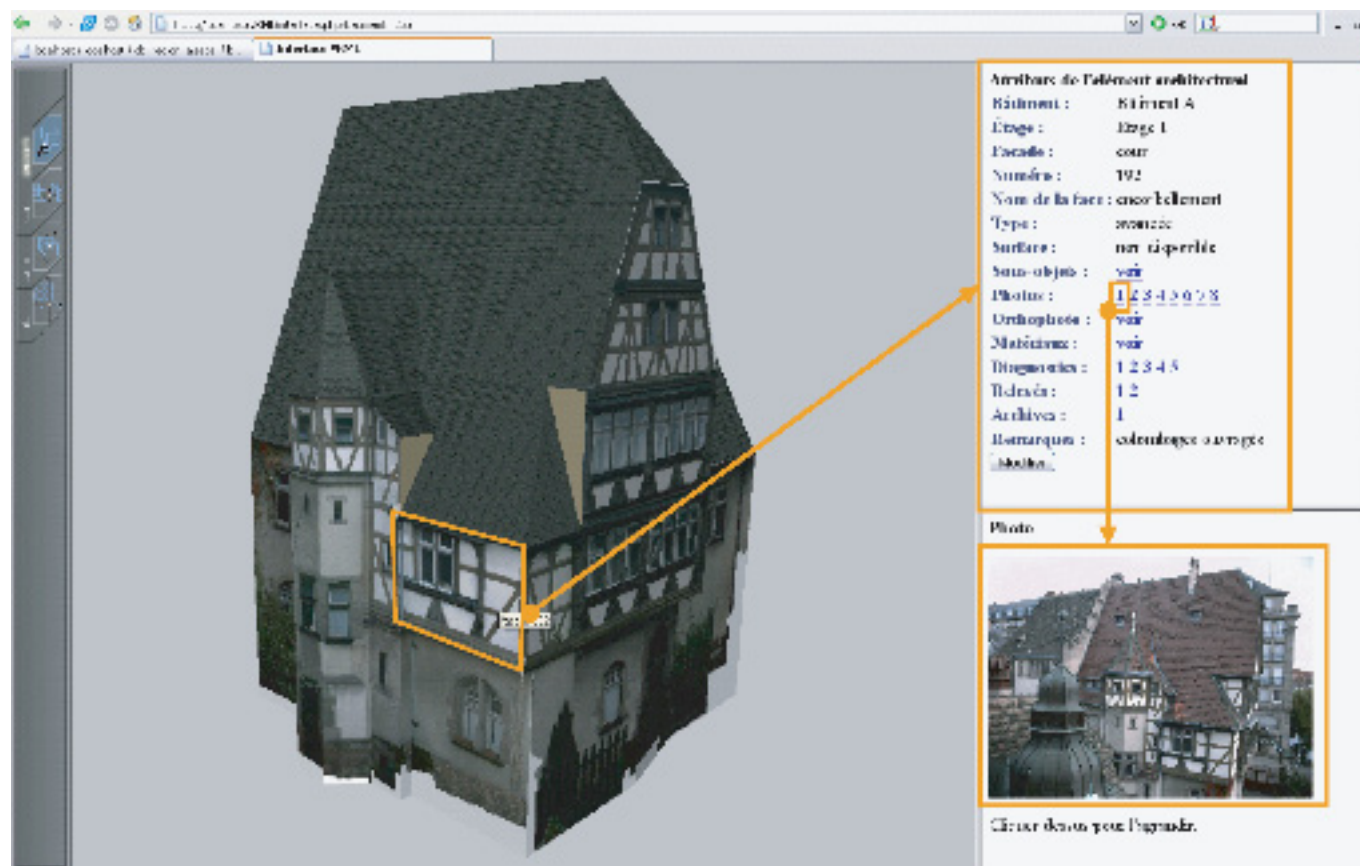


Figure 7. Interface d'accès aux documents.

interactif: lors du passage de la souris sur le modèle, on voit le nom des faces qui apparaît en tant qu'étiquette. Lors d'un clic sur cette face, la fiche de renseignements contenant ses attributs s'ouvre dans la fenêtre en haut à droite. La page HTML présentant ces attributs dans l'interface est générée à la volée par l'interpréteur PHP, qui va chercher les informations concernant la face cliquée dans la base de données et les affiche suivant une mise en forme choisie dans le programme PHP. Le bouton "Modifier" permet d'éditer les données et de les mettre à jour.

Les données non alphanumériques, telles qu'images, plans, descriptions de sous-objets, sont visibles par le biais d'un aperçu affiché par un simple clic sur un lien situé dans la zone de texte.

Conclusion et perspectives

La mise en place d'une interface tridimensionnelle de gestion de patrimoine a donné lieu à une collaboration entre la direction des services techniques de la région Alsace et le Laboratoire MAP-PAGE pour le développement d'un outil approprié à des besoins précis. Basé sur des principes simples et pérennes l'interface est d'une grande accessibilité et simplicité d'utilisation, comme cela était souhaité dans le cahier des charges. La mise à jour de la base de données se fait à partir des représentations tridimensionnelles du patrimoine bâti à gérer. Il faut toutefois noter qu'il faudra, pour passer de cette phase expérimentale à une véritable exploitation sur l'ensemble des lycées, d'une part faciliter les modifications du modèle pour rendre possible sa mise à jour suite à des travaux et d'autre part envisager des niveaux de rendu adaptés aux situations et aux typologies d'ouvrage à gérer. Par ailleurs, les méthodes et les outils informatiques qui permettent de construire et de modifier le modèle devraient être accessibles à des prestataires tels que des géomètres et des architectes en assurant notamment leur intégration dans des logiciels métiers utilisés couramment pour le levé, pour la gestion du patrimoine. ●

Contacts

**Emmanuel ALBY - Elise MEYER
Pierre GRUSSENMEYER**

Equipe Photogrammétrie et GEomatique,
MAP-PAGE UMR 694

INSA de Strasbourg

24 Boulevard de la Victoire, 67084

STRASBOURG, France

emmanuel.alby@insa-strasbourg.fr

elise.meyer@insa-strasbourg.fr

pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr

Mauro RAMPAZZO

Pôle Gestion Durable du Patrimoine,

Direction des Services Techniques

Région Alsace 1 place du Wacken

67000 STRASBOURG, France

mauro.rampazzo@region-alsace.fr

Références

Alby, E., 2006. *Elaboration d'une méthodologie de relevé d'objets architecturaux: contribution basée sur la combinaison de techniques d'acquisition.*

Thèse de doctorat en Sciences de l'Architecture de l'Université Henri Poincaré, Nancy, 260p.

Drap, P., Long, L., Durand, A.,

Grussenmeyer, P., 2001. *Un système de gestion de documents hétérogènes dédiés au patrimoine archéologique et gérés sur le réseau Internet. Le cas de l'épave Etrusque du Grand Ribaud. BDA'2001 (Agadir, Maroc), 17^e Journées Bases de Données Avancées.* Ed. Mouaddib, N., Cepadues-Editions, Toulouse, ISBN 2854285700, pp. 353-362.

Grussenmeyer P., Hanke K., Streilein

A., 2001. *Photogrammétrie architecturale. Chapitre dans "Photogrammétrie numérique".* Edité par M. Kasser et Y. Egels, Editions Lavoisier-Hermès. ISBN 2-7462-0311-1, pp. 317-352.

Grussenmeyer, P., Alby, E., Meyer, R.,

Rampazzo, M., 2006. *3D building model as an interface for a Web Information System. Case study of the Pontonniers high school in Strasbourg.* ISPRS Comm. V Symposium, Dresden, Sept. 25-27, Germany. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5, ISSN 1682-1750, 6 p.

Leukert, K., Reinhardt, W., 2000.

GIS-internet architectures. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXXIII, Part B4, pp 572-579.

Meyer, E., Grussenmeyer, P., Perrin, J.-P. Durand, A. Drap, P., 2006.

Intra-site Level Cultural Heritage Documentation: Combination of Survey, Modeling and Imagery Data in a Web Information System. Short papers from the joint event CIPA / VAST / EG / EuroMed 2006, 30 October – 4 November 2006, Nicosia, Cyprus. Edited by M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania, EPOCH Publication, ISBN-10: 963 8046 74 0., pp. 129-134.

Pérouse de Montclos, J.-M., 1993.

Principes d'analyse scientifiques, architecture, vocabulaire. Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France. Imprimerie nationale, Paris.

Vigan (de), J., 1992. *Dicobat:*

dictionnaire général du bâtiment. Editions Arcature, Ris-Orangis.

ABSTRACT

Keywords: Architecture, modeling, cultural heritage, orthophotos, decision support, Web 3D model

The development of a three-dimensional management interface of the "Lycée International des Pontonniers" in Strasbourg took place in three stages.

The documentation by multi-image photogrammetry in PhotoModeler has been followed by a definition and qualification step of the geometry in Sketchup and AutoCAD, linked with the measured data in order to obtain a model in VRML format. The model as well as all data at disposal in the project have afterwards been managed in a data base. The result allows a fast and ergonomic access with the 3D model visualized in a Web interface.

Sur les plans de Paris : des portes ouvertes sur l'en-deçà du sol

"Qu'il est bon de ne pas ignorer ce qu'on a sous les pieds. Ce peut être un trésor."

Dictionnaire français-gaulois de Jean-Paul Savignac (chez "La Différence")

"C'est important de chercher la souche, le terroir, les racines (...) d'exhumer les restes qui sont sous nos pieds ...

Des restes qui font, par essence, partie d'un patrimoine mondial non renouvelable".

Yves Coppens, paléontologue, membre de l'Institut, professeur au Collège de France (le 16 mai 2003)

■ Gilles THOMAS

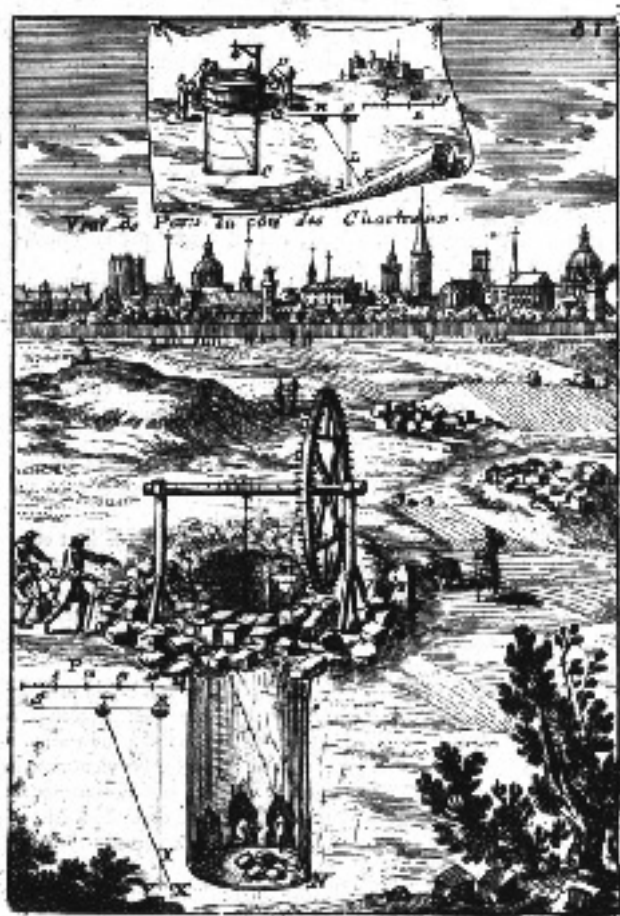
Nous vous avons précédemment parlé de la cartographie du sous-sol parisien (voir "Les dessous de Paris «Cartes sur Table»" in XYZ n°107 et 108). S'il fut nécessaire de dresser les plans de ces exploitations souterraines, leur présence transparait parfois sur certains des plans que Paris fit dresser de sa topographie urbanistique.

En effet, à l'instar d'un iceberg dont la partie émergée ne représente qu'un dixième de ce qui est caché sous la surface des océans, les carrières souterraines transparaissent aussi à la surface du sol par leurs points d'accès : les puits d'extractions (lors de leur période d'activité), les puits de service et autres moyens d'y pénétrer (créés lors des travaux de consolidation exécutés par l'Inspection des Carrières).

Quand les carrières imprimaient leurs "formes" dans le paysage parisien

Lors de notre premier article, nous vous avons indiqué que l'exploitation du sous-sol de Paris commença à l'époque gallo-romaine, et que, suite à une épaisseur de morts-terrains de plus en plus grande, les carriers eurent l'idée de pénétrer dans la couche de calcaire par des bouches de cavage, ou entrées de plain-pied. Plus l'exploitation s'enfonçait sous terre, plus les carriers avaient de chemin à parcourir pour ressortir les matériaux, aussi eurent-ils l'idée de percer des puits à partir de la surface qui avaient un double avantage : assurer une meilleur aération du site souterrain, et permettre une sortie plus directe des blocs en fond d'exploitation sans avoir à retourner jusqu'à l'entrée primitive. Afin de pouvoir accéder aux mêmes bancs de calcaire directement à partir de la surface des plateaux les recouvrant, les carriers développèrent alors cette méthode par puits d'extraction, leur évitant ainsi de creuser une entrée en pente douce qui nécessite énormément de terrain si l'on veut éviter que la déclivité ne soit trop raide.

Ces puits d'extraction de plusieurs mètres de diamètre (de 3 à 6 mètres au maximum), étaient appareillés jusqu'à la rencontre avec la masse de pierre. Les matériaux provenant du creusement permettaient la réalisation d'une plateforme, faci-



Cette illustration intitulée "Veuë de Paris du côté des Chartreux", permet de comprendre le principe des treuils à chevilles utilisés par les carriers pour remonter les blocs de calcaire des sous-sols. Cette gravure de 1702 est extraite de "La géométrie pratique (divisée en quatre livres)" de Alain Manesson-Mallet (cartographe et ingénieur français 1630-1706), ouvrage publié à des fins pédagogiques pour une initiation à la géométrie.

litant ainsi le chargement des chariots venant chercher les blocs pouvant peser plusieurs tonnes ; c'est ce que l'on appelle la "forme" de la carrière. Pour amener du fond de la carrière les blocs de pierre extraits, le premier système imaginé était particulièrement rudimentaire, puisque basé uniquement sur la force musculaire, mais suffisamment efficace pour qu'il perdure alors que l'extraction des mines était mécanisée depuis longtemps. Il s'agit d'une gigantesque roue en bois dont le cercle est percé de part en part par des échelons régulièrement espacés, permettant à un homme de faire tourner la-dite roue en marchant sur les barreaux (appelés des ranches) à la manière d'un écureuil dans sa cage ; mais à la différence de l'animal qui évolue à l'intérieur de sa roue-jouet, l'homme est un animal épris de liberté qui se trouve donc en quelque sorte à l'extérieur de l'engin de levage en y étant sur les bords. De par le rapport entre l'axe de la roue autour duquel s'enroule un cordage (d'abord en chanvre, qui par la suite sera remplacé par de l'acier) et son diamètre sur lequel évoluent de une à quatre personnes (en fonction de la masse à remonter), il y a une démultiplication permettant à un homme tout seul de tracter un bloc pesant une tonne. Cela n'était pas sans causer un certain nombre d'accidents, le moindre étant la rupture du cordage rompant l'équilibre entre masse et homme(s) qui dans ce cas tombaient de la hauteur où ils se trouvaient. Tandis que lorsque plusieurs individus étaient nécessaires pour remonter un bloc de plusieurs tonnes, si l'un d'entre eux perdait l'équilibre et chutait, alors le bloc de pierre prenait la prévalence et l'(es) autre (s) homme(s) restant étaient alors projetés par la roue interagissant comme une gigantesque fronde, accident dramatique s'il en fut !

Dans la région parisienne, ces treuils se comptèrent par dizaines dans la banlieue sud de Paris, jusque dans les années 1870, chaque propriétaire d'un terrain pouvant ou non exploiter lui-même (ou faire exploiter) la masse de pierre située en dessous. À la fin du chantier d'extraction, très souvent le puits était comblé, et ce qui pouvait être réutilisé de la structure aérienne était démonté pour être transporté à un autre emplacement. Cette profusion de roues n'est pas une exagération de l'esprit ; il suffit pour s'en convaincre de voir certains tableaux, de lire les descriptions qui ont pu paraître dans la littérature à l'époque (voir page suivante la relation qu'en fait un fameux contemporain : Alexandre Dumas), ou de regarder attentivement les plans de carrières (ou de surface) et de s'amuser à dénombrer les emplacements de ces anciens puits. Toutes ces entrées de carrières, facilement localisables sur plan ou repérables dans le paysage, et sûrement alors très accessibles, feraient certainement fantasmer de nos jours les *cataphiles* et autres modernes explorateurs de nos friches industrielles ! Ce ne fut peut être pas un fantasma pour tout le monde à l'époque. Déjà au XVIII^e siècle, Antoine Dupont (qui avait été chargé en 1776 des prémices de la première cartographie souterraine parisienne) informait que : *"Nous avons des gens qui viennent la nuit et les fêtes dans nos carrières. Ils nous débouchent les puits. J'ai le nom de trois et la demeure de deux que je viens de donner à Mr le lieutenant de police"* (lettre du 9 mai 1777). Tandis que son remplaçant et



© collection Paula Bain / photo Robert Chardon

Photo prise vers 1900 d'une roue de carrière à Clamart. C'est l'un des très rares documents photographiques, témoins directs de ce moyen d'extraction qui n'a pas survécu à l'entrée dans le XX^e siècle.

premier Inspecteur des carrières, Charles-Axel Guillaumot, architecte du roi, évoque les inconvénients *"qui peuvent résulter d'un asile impénétrable et toujours ouvert à cette multitude de malfaiteurs inséparables d'une capitale immense et des réserves que pourraient présenter ces cavernes à des mutins qui seraient tentés de s'y réfugier, pour s'y maintenir dans une indépendance funeste à leurs concitoyens"* (in Premier Mémoire manuscrit de Guillaumot, datant de janvier 1777). Ce n'était que la persistance de ces malandrins qui venaient la nuit se réfugier dans les carrières souterraines du château de Vauvert (au niveau de l'actuel jardin du Luxembourg) au début du XIII^e siècle, et qui donnèrent naissance à l'expression *"aller au Diable Vauvert"*.

Les derniers treuils (à manège) de carrières de la région parisienne

On peut noter qu'une telle "roue à écureuil" de carrière, mais de plus petite taille et donc utilisée comme un treuil manuel, l'ouvrier-élévateur restant à côté de l'engin pour le manœuvrer à la main, est encore visible de nos jours à Saint-Arnoult ■■■

© photo Robert Chardon



C'est le seul treuil à manège rétabli dans son état de fonctionnement. Ce travail exceptionnel est dû à une association "loi de 1901" : le PICAR. Il est miraculeusement parvenu jusqu'à nous parce que noyé dans une parcelle privée en plein milieu d'une zone pavillonnaire à Châtillon (Hauts-de-Seine), ville de la très proche banlieue parisienne puisque desservie par le métro. C'est donc véritablement un dinosaure anachronique que l'on peut venir observer de près lors des Journées du Patrimoine, ou tout simplement sur demande.

(près de Vendôme) ; elle date du XVII^e siècle et a été classée Monument Historique⁽¹⁾. Sans compter les quelques autres, de forme différente, qui sont toujours visibles dans des charpentes de cathédrales et autres églises (comme par exemple au mont Saint-Michel).

S'il était encore possible d'observer de tels exemplaires de roues au tout début du XX^e siècle, progrès aidant, elles furent progressivement et définitivement remplacées par ce que l'on nomme des "treuils à manège". Cette fois c'est la plus noble conquête de l'homme qui s'attela à ce travail ingrat consistant à faire quasiment du sur place pour entraîner l'élévation des blocs de calcaire débités à l'abri du ciel de carrière, vers des cieux plus aériens mais pas toujours cléments. Par l'intermédiaire d'un engrenage à renvoi d'angle, un cheval tournant autour d'un axe vertical positionné sur la forme de la carrière à proximité immédiate du puits, faisait tourner un axe horizontal autour duquel s'enroulait le câble remontant à la surface le produit du travail souterrain. Puis, pour le repos du cheval, celui-ci fut parfois remplacé par une machine à vapeur au XIX^e siècle, ou un moteur au début du XX^e, mais c'était déjà la fin des exploitations souterraines par puits. Des montants en pierre rigidifiant la mécanique de ces treuils, seules parties des plus résistantes de l'ensemble mais aussi soumises aux intempéries, il n'en reste plus que quelques-uns de visibles, parfois difficilement identifiables car ils ont souvent été tout

Le 1^{er} septembre de l'année 1831

La plaine qui se développe à l'entrée du petit Montrouge est étrange d'aspect. Au milieu des prairies artificielles, des champs de carottes et des plates-bandes de betteraves, s'élèvent des espèces de forts carrés en pierres blanches que domine une roue dentée pareille à un squelette de feu d'artifice éteint. Cette roue porte à sa circonférence des traverses de bois sur lesquelles un homme appuie alternativement l'un et l'autre pied. Ce travail d'écureuil, qui donne au travailleur un grand mouvement apparent sans qu'il change de place en réalité, a pour but d'enrouler autour d'un moyeu une corde qui en s'enroulant, amène à la surface du sol une pierre taillée au fond de la carrière et qui vient voir lentement le jour.

Cette pierre, un crochet l'amène au bord de l'orifice, où des rouleaux l'attendent pour la transporter à la place qui lui est destinée. Puis la corde redescend dans les profondeurs, où elle va chercher un autre fardeau, donnant un moment de repos au moderne Ixion⁽²⁾, auquel un cri annonce bientôt qu'une autre pierre attend le labeur qui doit lui faire quitter la carrière natale et la même œuvre recommence pour recommencer encore, pour recommencer toujours.

Le soir venu l'homme a fait dix lieues sans changer de place ; s'il montait en réalité, en hauteur, d'un degré à chaque fois que son pied pose sur une traverse, au bout de vingt-trois ans, il serait arrivé dans la lune.

C'est le soir surtout, c'est-à-dire à l'heure où je traversais la plaine qui sépare le Petit du Grand Montrouge, que le paysage grâce à ce nombre infini de roues mouvantes qui se détachent en vigueur sur le couchant enflammé prend un aspect fantastique. On dirait une de ces gravures de Goya, où, dans la demi teinte, des arracheurs de dents font la chasse aux pendus. Vers sept heures, les roues s'arrêtent : la journée est finie.

Ces moellons, qui sont de grands carrés longs de cinquante à soixante pieds, hauts de six à huit, c'est le futur Paris que l'on arrache de terre. Les carrières d'où sort cette pierre grandissent tous les jours. C'est la suite des catacombes d'où est sorti le vieux Paris. Ce sont les faubourgs de la ville souterraine, qui vont gagnant incessamment du pays et s'étendent à la circonférence. Quand on marche dans cette plaine de Montrouge, on marche sur des abîmes. De temps en temps, on trouve un enfoncement de terrain, une vallée en miniature, une ride du sol : c'est une carrière mal soutenue en dessous, dont le plafond de gypse (sic) a craqué. Il s'est établi une fissure par laquelle l'eau a pénétré dans la caverne ; l'eau a entraîné la terre ; de là le mouvement de terrain : cela s'appelle un fondis.

Si l'on ne sait point cela, si on ignore que cette belle couche de terre verte qui vous appelle ne repose sur rien, on peut, en posant le pied au-dessus d'une de ces gerçures, disparaître, comme on disparaît au Montanvert⁽³⁾ entre deux murs de glace.

Alexandre Dumas "Les mille et un Fantôme"

(1) Cette roue à chevilles en bois a été restaurée par l'association "Résurgence en Vendômois" : 7, rue Renarderie 41100 Vendôme.

(2) Figure un peu moins connue que celle de Sisyphe (qui pour avoir osé défier les dieux, fut condamné à rouler éternellement jusqu'en haut d'une colline une pierre, qui redescendait inexorablement chaque fois avant de parvenir à son sommet), ou que celle du tonneau des Danaïdes (qui remplissaient sans fin une jarre percée), de Prométhée attaché sur le mont Caucase et se faisant dévorer chaque jour le foie (organe qui repousse sans cesse) par un aigle, ou de Pénélope filant sa tapisserie le jour qu'elle détricote la nuit ; il s'agit ici d'une référence à Ixion héros de la mythologie grecque damné à être éternellement attaché à une roue enflammée tournant sans cesse dans les Enfers.

(3) Au pied de la mer de glace, aux environs de Chamonix.



Roues de carrières dans la "Plaine de Gentilly sous la neige" (nom de cette Huile sur Toile (60 x 80 cm) due à Léon Auguste Melle et datant de 1850 – Musée de l'Ile-de-France à Sceaux). Une partie des plaines de Gentilly et de Montrouge deviendront, après l'annexion de 1860, partie intégrante de Paris.

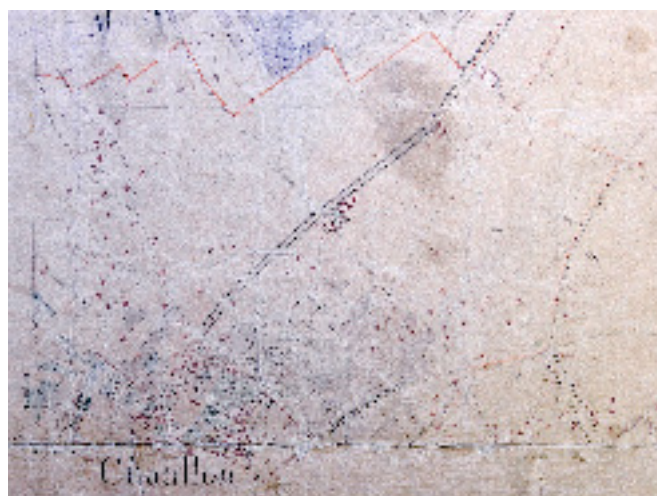
simplement utilisés comme source de moellons à moindre frais. En s'éloignant progressivement de la capitale, on peut en dénombrer moins d'une dizaine dans la région parisienne, et pour la plupart uniquement quelques vestiges : le premier à Châtillon, magnifiquement restauré par une association de bénévoles (le PICAR⁽⁴⁾) et inscrit à l'inventaire supplémentaire des Monuments historiques, un à Chavenay (dans la plaine de Versailles, entre Saint-Nom la Bretèche, Plaisir et les Clayes-sous-Bois) dont il ne reste que des rognons de piles en bien mauvais état il est vrai⁽⁵⁾ mais possédant néanmoins une forme très photogénique, un troisième à Marly la Ville (Val d'Oise), un autre à Verberie (dans l'Oise), et un dernier à Éméville (également dans l'Oise), qui est depuis peu entre les mains d'une jeune association (Carrières Patrimoine). Tandis que dans cette même ville l'association "Roches et Carrières"⁽⁶⁾ vient de débiter des travaux de fouille mettant à jour les bases des piles d'un autre manège.

Contrairement aux puits à eau (qui eux étaient des éléments indispensables au développement urbain), les puits d'accès aux carrières souterraines furent des éléments structurants du paysage au même titre que les moulins. Par contre s'il est possible pour un moulin de lui donner un nom pérenne, ce n'est pas le cas pour les puits des carrières qui sont des constructions non pas mobiles (il existe cependant des éléments qui le sont, comme on l'a vu supra), mais à la durée de vie très limitée par le temps d'extraction de la surface de pierre à laquelle elle donne accès ; cette limitation n'étant pas due à l'étendue de la couche géologique, mais à la surface du terrain au dessus, puisque de la propriété du sol découle la pro-

(4) PICAR = Institut de Sauvegarde du Patrimoine industriel des carrières (19, rue Ampère – 92320 Châtillon)

(5) Le dessin des piles de ce treuil est utilisé comme logo par l'Association pour la protection du patrimoine culturel de Chavenay.

(6) Roches et Carrières : 7, rue de la Forêt – 60123 Éméville.



"Minute 60 au 1/10 000° de la carte d'État-Major n°48" (qui elle, est au 1/80 000°), provenant des "Travaux des élèves ingénieurs géographes de l'armée pour la mise en place d'une nouvelle carte de France en 1810-1828". Sur cette carte levée par M. De Plonnies Capitaine au Corps royal des Ingénieurs-Géographes pendant la campagne de 1819, les emplacements de puits de carrières (surmontés à l'époque par un treuil) sont matérialisés par un double rond, l'enveloppe extérieure pouvant représenter la forme, l'interne étant le puits à proprement parlé.

priété du sous-sol (article 552 du code civil). Ces pourquoi, lors de certaines cartographies cadastrales, les localisations de tous ces éléments aériens des carrières ont été répertoriées. Par exemple sur le plan issu des "Travaux des élèves ingénieurs géographes de l'armée pour la mise en place d'une nouvelle carte de France (1810-1828) pour la carte dite d'État-Major" ; d'autant plus que pour mener à ces entités extractives, des chemins d'accès étaient nécessaires, voies suffisamment larges pour permettre le passage des chariots, et qu'il convenait aussi de représenter sur ces cartes.

Les industries extractives sur les anciennes cartes de "Paris et ses faubourgs"

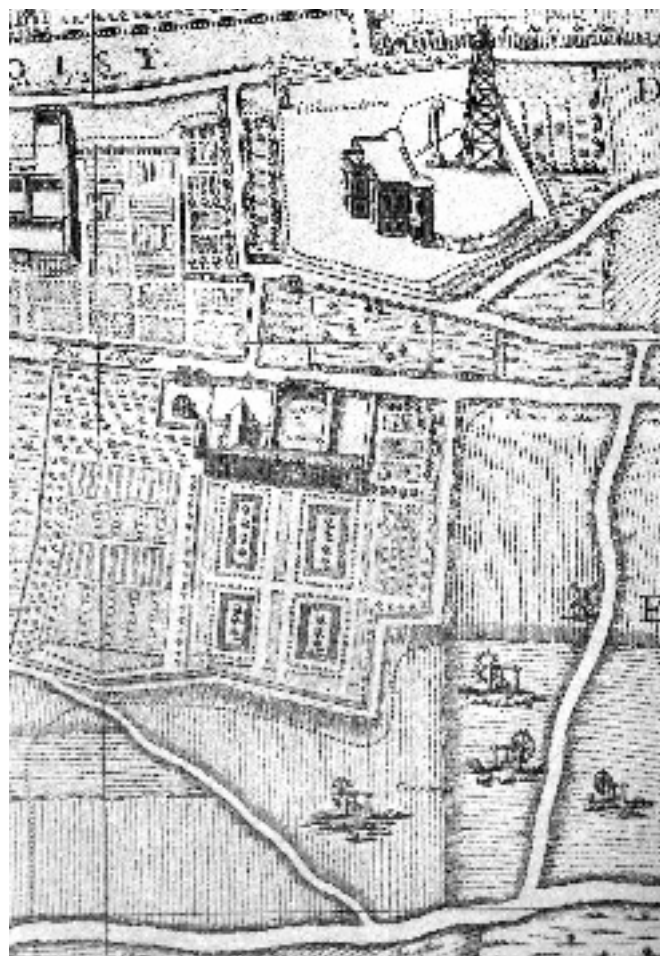
Il pourrait d'ailleurs être intéressant de se plonger dans un inventaire de ces anciens puits d'extraction, à la fois par l'intermédiaire de la cartographie de l'Inspection des carrières, mais aussi on le voit de certains plans de surface où ils sont matérialisés, à l'instar de ce qui a été fait pour les moulins à partir des plans de Paris à toutes les époques. Voire de ce qui existe aussi pour les puits à eau, leur recensement actuel ayant utilisé cette double cartographie surface/sous-sol, puisque si les puits de carrières sont dessinés sur les cartes du "dessus", à l'inverse les puits à eau le sont aussi sur celles du "dessous". D'autant plus que s'il appert que les puits de carrières sont beaucoup plus nombreux que les moulins (forcément puisque on apporte du blé à son moulin – à usage collectif –, comme le veut l'expression française, tandis que chaque carrière induit la construction d'un puits qui lui est propre), ils seront toujours

■ ■ ■ en un infiniment moins grand nombre que les puits à eau : pendant le siège de 1870, on dénombra 30 000 puits à eau, dont 10 000 furent considérés bon pour le service.

La localisation des moulins est peu sujette à caution car ce sont des éléments disparates, et suffisamment isolés pour pouvoir être identifiés précisément ; ce qui a permis d'en dresser un inventaire relativement exhaustif au long de l'histoire de Paris, en faisant simultanément des comparaisons entre les plans et les sources archivistiques. Alors que sur un plan lorsqu'elles apparaissent, les roues de carrières sont plus souvent dessinées pour indiquer là où il y a eu exploitation... et non l'emplacement précis de ces roues et donc des carrières individualisées. Dans un même et proche horizon, il pouvait y avoir surabondance de roues, ce que corroborent quelques tableaux (par exemple celui de la plaine de Gentilly) ou des descriptions dans la littérature qui évoquent de très nombreuses roues... à l'image des actuels (ou programmés) champs d'éoliennes, qui ne seront jamais qu'un avatar métallique moderne (mais rachitique quant au nombre de rayons) de nos nobles roues en bois de carrières, qui elles brassaient autre chose que du vent !

Pour un tel travail de bénédictin, on pourra se plonger dans différents plans bien connus des historiens, tels le plan de "Paris et ses environs" (dit "le grand plan") de Albert Jouvin de Rochefort (1672). Ou le plan levé en 1676 par Pierre Bullet (associé à François Blondel directeur de l'Académie royale d'Architecture) et sur lequel apparaît l'Observatoire tout juste construit. Ou bien encore celui qu'a dressé le sieur Roussel⁽⁷⁾, ingénieur ordinaire du roi, de "Paris, ses faubourgs et ses environs, où se trouve le détail des villages, châteaux, grands chemins pavés et autres, des hauteurs, bois, vignes, terres et prés"(1730) ; on pourrait y ajouter ses moulins et ses (roues de) carrières, car il présente de nombreuses carrières en "sous-œuvre", identifiables par ce dont on vient de parler abondamment et qui est à la fois symbolique et emblématique des dites carrières souterraines de pierre de taille : la roue à chevilles. Image tellement intimement associée à ces exploitations souterraines (reconnaissons-le, la seule partie émergée de l'iceberg de ces carrières et donc la seule excroissance visible par la population) qu'il n'est pas nécessaire d'en porter une légende dans la marge du plan. D'ailleurs cette roue en bois deviendra le blason de la "Corporation des carriers de France" (présenté à l'Exposition Universelle de 1900⁽⁸⁾), puis repris à la fin des années 70' comme logo par la première association parisienne ayant pour vocation l'étude des anciennes carrières souterraines de Paris : le CAPRA (Cercle Amical et Philanthropique de Recherches Anciennes).

Sur les plans d'un contemporain, Jean Delagrive⁽⁹⁾ (1728 et 1740), les carrières sont schématisées par l'usage de signes symboliques similaires. Ce plan possède aussi la particularité d'être strictement orienté avec le Nord vraiment en haut du plan (donc le cours de la Seine légèrement oblique) ; la représentation de Paris ne répond donc plus exclusivement à des critères esthétiques. Delagrive précise d'ailleurs qu'un plan de ville doit respecter les mêmes règles que les cartes topographiques, et qu'il doit être orienté au nord, sur la méridienne



© photo Robert Chardon

Pierre Bullet leva ce plan entre 1673 et 1675 (la construction de l'Observatoire commencée le 21 juin 1667, jour du solstice d'été, avait été achevée en 1672). Cette édition est de 1710, l'originale datant de 1676. Parmi les éléments constitutifs du paysage autour de la rue d'Enfer (actuelle avenue Denfert-Rochereau par un jeu de mot post guerre de 1870) retenus par Bullet : le réservoir des eaux d'Arcueil, un moulin (celui des Mathurins, dit aussi de Saint-Jacques)... et des treuils de carrières.

"qui passe de l'Observatoire à un Pilier de pierre que l'on a dressé contre un moulin à gauche de Montmartre". Il est en cela comparable à celui de Guillaume Delisle (1716) qui pour la première fois était construit sur le Méridien de Paris car "pour orienter ce plan, il ne me restait plus qu'à y tracer exactement une Méridienne. Je ne pouvais en choisir de plus avantageuse que celle de l'Observatoire Royal". Ce plan introduit aussi pour la première fois le quadrillage qui renvoie à une table alphabétique, comme le fera Delagrive pour les "rues,

(7) À ne pas confondre avec Claude Roussel, graveur, marchand et éditeur d'estampes (décédé au début du XVIII^e siècle) qui le premier introduisit sur un plan l'emploi de signes symboliques.

(8) Selon les termes de l'héraldique, ce blason est "D'Azur, à une roue de Carrière en or, corde et chaîne de même, appuyée sur deux piles d'Argent, et extrayant une pierre de taille de même".

(9) Il fit ses études à Paris, puis entra dans la congrégation des Lazaristes où il fut ordonné prêtre. Mais il quittera définitivement ses habits sacerdotaux pour se lancer dans le lever de la capitale.

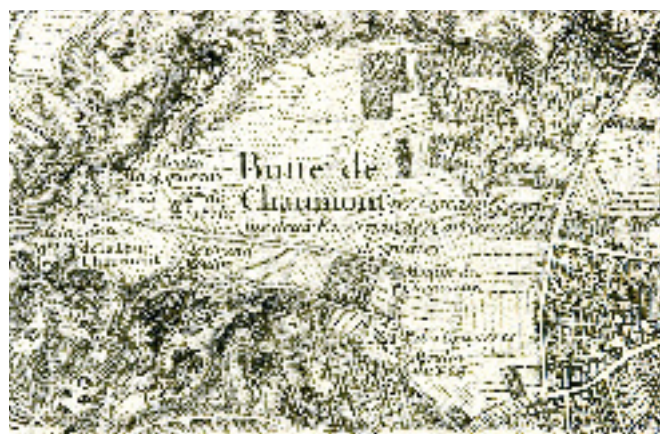


Sur ce plan de Roussel (1731), on peut observer de très nombreuses carrières en "sous-œuvre" dans la plaine de Montrouge, dont le secteur dit du Petit-Montrouge deviendra en 1860 un des quartiers du 14^e arrondissement. Le plan est orienté relativement à la "Ligne du Méridien", suivant en cela la règle apparue depuis celui de Guillaume Delisle en 1716. Remarquez aussi la carrière de charbon de terre au niveau de l'hôpital Sainte-Anne (= de la Santé).

églises et communautés, hôtels, etc..., artifice qui depuis est devenu la norme dans tous les plans de ville. L'Atlas souterrain de la Ville de Paris de Eugène de Fourcy suivra le même principe de centrément, faisant en cela de l'Observatoire le centre du monde civilisé à la fois de surface, et d'"outre-catacombes". Bien évidemment sur d'autres plans, des carrières apparaissent aussi localement (sous la forme de dessins de treuils) : le plan de Jean de La Caille (1714), le plan Le Rouge vers 1755 (carrières près de la Salpêtrière), celui de Desnos en 1762 (extractions au sud des Chartreux), la carte du "Département de la Seine décrété le 13 et 19 janvier 1790 par l'Assemblée Nationale", la "Carte topographique et statistique des environs de Paris" par Maire (1825). Ceci sans oublier bien sûr la carte des Chasses du Roi de Jean-Baptiste Berthier, interrompue faute de crédits (1764-1807), ni des cartes militaires moins répandues mais qui peuvent s'avérer riches en informations topographiques, comme par exemple la carte dite



Carte du "Département de la Seine décrété le 13 et 19 janvier 1790 par l'Assemblée Nationale. Divisé en 3 arrondissements et avec la division de Paris en 12 justices de Paix et 12 Mairies". Là encore, en cette fin du XVIII^e siècle, les moulins et les carrières souterraines agrémentent le paysage des faubourgs sud de Paris.



Sur le nord-est du plan de Roussel (1731), au niveau de la "Butte de Chaumont" (actuel 19^e arrondissement), le paysage est là aussi constitué de moulins et de carrières. Avec cette différence par rapport au sud : les carrières sont cette fois de gypse et sont représentées par des excavations permettant d'accéder à des bouches de cavage pour l'exploitation en souterrain. Au niveau de Montmartre (plein nord du même plan, mais non présenté ici ; actuel 18^e arrondissement) c'est la même chose.

d'État-Major de 1810-1828 (cf. *supra*). La liste de plans précédente est bien évidemment non exhaustive, cet article ne constituant que les prolégomènes d'une étude à venir.

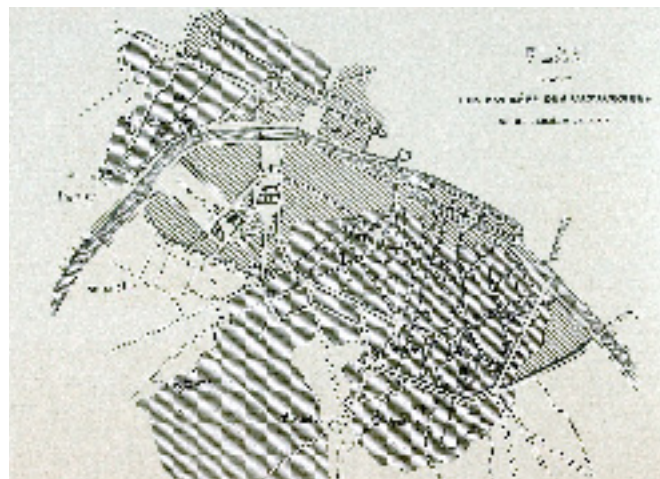
Tandis que pour l'exploitation du gypse (à l'origine du plâtre par déshydratation), qui répond à d'autres contraintes que pour le matériau calcaire, la représentation des carrières sur les plans (actuels 18^e, 19^e et 20^e arrondissements, donc rive droite) se fait par d'autres moyens. Les plâtrières, lorsqu'elles sont dessinées, y sont schématisées par un ombrage hachuré, percé parfois par des entrées de plain-pied parfaitement identifiées. Cet artifice de dessin donne une impression de relief, à la manière des découvertes de calcaire (= les exploitations à ciel ouvert), ou à

■ ■ ■ proximité de la “mine de charbon de terre” près de Sainte-Anne. En effet, l'extraction du matériau gypse s'effectuait sans aucun treuil à partir de la surface, mais uniquement par des bouches de cavage (soit à flanc de coteau, ou dans le front d'une exploitation à ciel ouvert). Comme exemple, on pourra se reporter au plan de Gomboust (1652) où les plâtrières de Montmartre sont visibles, ou jeter un œil sur le plan de Trudaine ou celui de la “Seigneurie de St-Lazare-Lez-Paris” (milieu du XVIII^e siècle) pour y voir les Buttes Chaumont et ses carrières d'Amérique, qui font parfois penser à un paysage lunaire.

De nouveaux accès vers les “insondables abîmes” menaçant la capitale

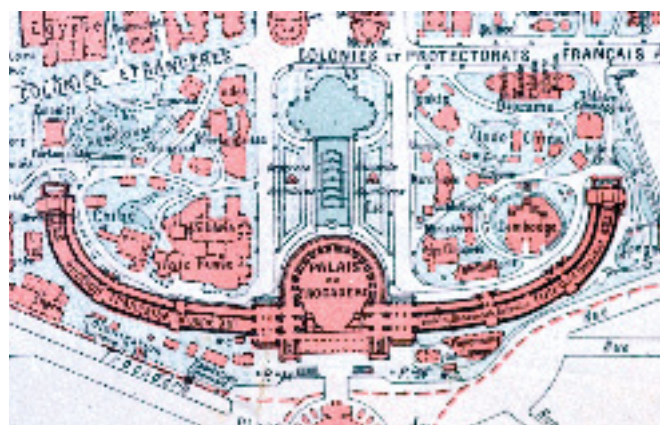
Les carrières de la région parisienne fermèrent les unes après les autres, les exploitations souterraines cessant non pas nécessairement faute d'exploitants, mais surtout par épuisement du filon de pierre utilisable, et les carrières retombèrent dans l'obscurité qui les vit naître et un silence pas nécessairement de bon aloi car préfigurant des ennuis en préparation. Et effectivement, selon le principe physique bien connu d'entropie, les pleins ont tendance à tomber dans les vides ; et cette tranquillité, à l'égal d'un œil de cyclone terrestre, précéda une tempête d'effondrements meurtriers qui virent la création de l'*Inspection des Carrières souterraines de Paris, et plaines adjacentes* le 4 avril 1777. Ses trois fonctions étaient 1) de rechercher tous les vides issues des anciennes exploitations souterraines, 2) d'en dresser la cartographie afin 3) de consolider ce qui était sous les voies publiques et les bâtiments du roi. Et pour se faire il fallait pouvoir accéder à des vides dont les anciens moyens d'accès n'étaient plus forcément d'actualité. Bien évidemment quand des puits ou des escaliers privés permettaient de pénétrer dans ce sous sol menaçant “tout Paris d'un péril imminent”, l'IDC les utilisait. Parfois même, cela se faisait à la faveur d'un fontis, mais pas sans risque, aussi l'Inspection dut-elle elle-même se ménager ses propres accès. Lorsque au milieu des années 1780 il fut décidé de créer des Catacombes à Paris pour y translocater les ossements, d'abord du cimetière des Saints-Innocents (pour des raisons de salubrité publique), puis de tous les cimetières parisiens, il fut là encore nécessaire d'aménager de nouvelles ouvertures. Et ensuite, en fonction des travaux de surface, si ceux-ci touchaient des zones de carrières, certaines servitudes furent réservées dans le parcellaire parisien ; ainsi fut fait à la fin du XVIII^e siècle (voir les escaliers Bonaparte, rue de l'Essai, rue Freycinet, de la Barrière de Fontainebleau = place d'Italie, rue Kléber, rue Notre-Dame des Champs, du jardin des Plantes, de la rue Dareau = Rémy Dumoncel, de la Barrière et du Cimetière de Vaugirard), au tournant de la guerre de 1870 (cf. Petite Ceinture, Bastions 73, 80, 89 de l'enceinte dite de Thiers, réservoirs de la Vanne, boulevard Saint-Marcel, rond-point des Fourneaux), et encore au milieu du XX^e siècle (les escaliers menant à des abris de Défense Passive, ou ceux dits de Régie par exemple).

Ces servitudes portent bien leur nom puisque le service de l'Inspection étant dépendant d'eux, parfois des travaux ulté-



© collection Claude Huguet / photo Franck Albaret

Plan publié dans “L'Illustration, Journal universel” en 1844. Par des lettres ou des numéros sont indiquées des entrées alors utilisées pour accéder aux galeries de servitude de l'Inspection des carrières. Mais comble de malchance, la légende qui aurait dû donner les localisations a été omise lors de la publication.



© BAVP 100714; photo Franck Albaret

Sur ce plan de l'Exposition Universelle de 1900 édité par A. Taride (pour le “Guide bleu” du Figaro), on voit de part et d'autre des fontaines du Trocadéro cette indication “Descente des Houillères”... ce qui correspond à un projet initial qui n'a pas été retenu. Au final, au niveau de ces bassins seront aménagées l'entrée et la sortie de l'exposition le “Monde Souterrain” organisée dans les anciennes carrières du Trocadéro (voir le plan page 62).

rieurs entraînèrent la modification voire le déplacement de certains escaliers, afin de les maintenir. Celui de la Barrière de Fontainebleau construit en 1786, fut déplacé à deux reprises (1904 et 1906) lors de la construction du métropolitain. L'escalier de la Barrière du Maine construit en 1804 fut reconstruit en 1899. Dans le jardin des Plantes, l'escalier circulaire construit en 1808 au pied du pavillon d'Administration, fut condamné en 1880 avant d'être rétabli en 1896. Les escaliers des rue Bonaparte (dit aussi maintenant de l'allée du Séminaire) et du Bastion 73 subirent aussi un déplacement de leur point d'émergence. Tandis qu'au niveau du 73, rue Notre-Dame des Champs, lorsque fut construit l'immeuble dans

lequel habita entre autre Henry le Chatelier chimiste bien connu car à l'origine de plusieurs lois (Polytechnicien de la promotion 1869, ingénieur des Mines 1872), l'accès à l'escalier⁽¹⁰⁾ fut préservé en symétrisant la façade par deux portes, l'une pour monter dans les étages, l'autre pour descendre dans les "catacombes" !

Ne pas confondre Catacombes et catacombes !

Si nous vous parlons de ces ouvertures particulières, c'est que là encore, il est parfois possible de les identifier sur certains plans "de surface", principalement lorsque l'emprise de ces escaliers nécessita la construction d'un édicule parce que débouchant en "plein champ" (ceux qui sont parfaitement intégré dans un bâti préexistant, n'ont aucune raison de transparaître sur les dits-plans). Et si nous employons ici le vocable erroné de "Catacombes", c'est à bon escient. En effet c'est en 1782, par analogie avec celle de Rome, que ce terme de catacombes a été introduit dans le vocabulaire français pour désigner le lieu qui allait être consacré (au deux sens du terme) au dépôt des ossements délocalisés de ce qui devait être leur dernière demeure. Et depuis, grâce à ce choix marketing judicieux et d'une pertinence rarement égalée, l'ensemble des anciennes carrières souterraines de la Ville de Paris est désigné par ce simple mot; vouloir lutter contre cette synecdoque métonymique, c'est un peu se battre contre les moulins à vent puisque même des scientifiques de formation ont préféré ce raccourci. En effet, en 1897 Armand Viré (pourtant docteur ès Sciences) créa dans les carrières du jardin des Plantes, le "Laboratoire des Catacombes". De même Louis de Launay (ingénieur des Mines) créa pour l'Exposition Universelle de 1900 dans les "Catacombes du 16^e arrondissement" deux extensions souterraines: l'Exposition Minière Souterraine, ainsi que le Monde Souterrain.

Pierre-Léonce Imbert qui écrivit en 1867 un roman autobiographique s'intitulant "Les catacombes de Paris" (ouvrage ré-édité en 1876 sous la forme d'un chapitre du recueil "À travers Paris inconnu"), rappelle que le public dénomme "Catacombes" les carrières situées sur la rive gauche de la Seine. Il signale par la même occasion qu'à cette époque les portes de plusieurs entrées étaient manquantes, notamment à Montsouris entre le palais du bey de Tunis et le chemin de fer de ceinture, et que dans les plaines il était aussi facile de pénétrer dans les carrières en utilisant les puits, bien que pour empêcher l'utilisation de ces accès, les "échelles de perroquet" avaient été démunies de leurs trois ou quatre échelons supérieurs.

Comme si il y avait une volonté d'entretenir ce mythe du sous-entendu par le non dit (toute la rive gauche de Paris serait bâti sur d'inextricables "abîmes catacombesques"), une personne attentive peut donc parfois apercevoir sur des plans de Paris postérieur à 1809⁽¹¹⁾ et pourtant exclusivement consacrés à la surface de la ville, des indications "Entrée des Catacombes"⁽¹²⁾, même à des endroits très éloignés de la place Denfert-Rochereau⁽¹³⁾. Là aussi cette localisation est trompeuse puisque si l'entrée officielle s'effectue bien au



© photo Franck Albaret

Dernière porte aux armes de l'Inspection générale des carrières (du département) de la Seine". Celle-ci se trouve avenue Reille, au niveau du réservoir de Montsouris (aussi dit de Montrouge ou de la Vanne), pour accéder à la servitude située dans son enceinte. Construit en 1874 (117 marches; 23 m 45), c'est le plus profond des carrières de Paris intra-muros. Il est dépassé uniquement par celui situé rue Jean-Marín Naudin à Bagneux, au carrefour avec l'avenue Victor Hugo, escalier circulaire moderne qui est ainsi le plus profond des carrières de Paris au sens large – ce que certains appellent le Grand Réseau Sud – avec 26 m 30.

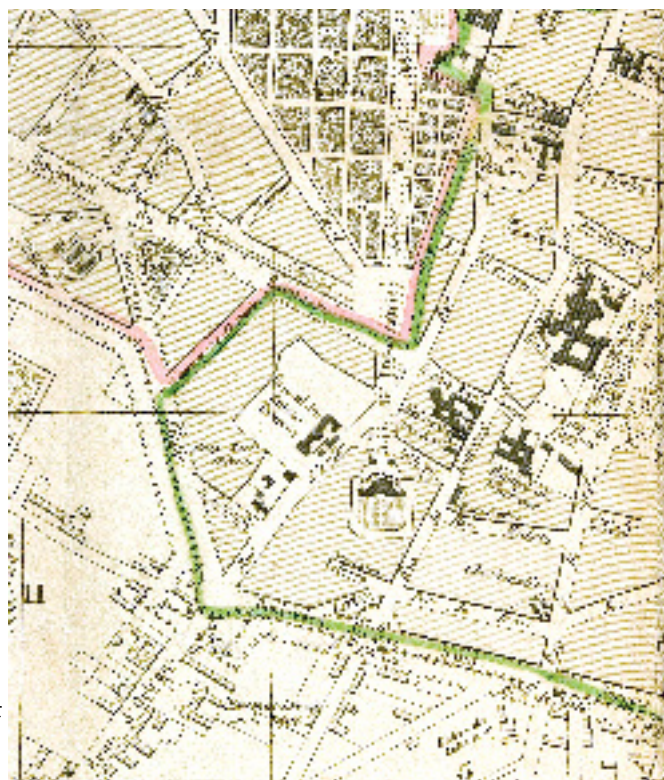
niveau de l'ex-Barrière d'Enfer du mur d'Octroi, le lieu de ré-inhumation des ossements délocalisés de tous les cimetières parisiens (de fin 1785 à 1814, puis en 1859-1860) se trouvait sous l'ex-Plaine de Montrouge, alors campagne de Paris. C'est donc ainsi qu'il ne faut point s'étonner de rencontrer divers endroits sur les cartes où l'on peut lire "Entrée des catacombes" car on l'a bien compris, il y a "Catacombes" (= Ossuaire municipal de la Ville de Paris, dont la seule entrée actuellement est sise avenue du colonel Henri Rol-Tanguy, ex-place Denfert-Rochereau) et catacombes (= anciennes carrières souterraines dans leur ensemble⁽¹⁴⁾). Tandis que paradoxalement, sur la "Carte géologique souterraine" datant pourtant de 1858 (et contemporaine de l'Atlas souterrain de Paris de De Fourcy), aucune entrée n'est répertoriée !

(10) Dans le vestibule de celui-ci se trouve une date inscrite au pochoir et semblant officielle: 8 7bre 1868.

(11) 1809 : année d'ouverture au public de la visite du musée des Catacombes de Paris ou Ossuaire municipal.

(12) Par exemple l'Atlas administratif de la Ville de Paris publié en 1821, indique déjà au niveau de la place d'Enfer l'entrée des Catacombes, qui sont en peu de temps devenues un site touristique majeur incontournable.

(13) Ce lieu est emblématique de l'Ossuaire municipal de la Ville de Paris, puisque en étant l'entrée et donc la partie émergée, c'est le point de rendez-vous de toutes les personnes désireuses de le visiter, par simple curiosité ou pour rendre hommage aux mânes de leurs ancêtres.



Plan de l'Exposition de 1900. Ce plan particulier est le seul de cette Exposition Universelle présentant à la fois les pavillons construits sur la colline du Trocadéro pour l'occasion, et ce qui se passe au dessous, au niveau des anciennes carrières souterraines qui avaient été aménagées pour deux expositions. À gauche (sous l'aile nord-est du palais du Trocadéro) l'Exposition Minière Souterraine; sous les fontaines et le bâtiment central, le Monde Souterrain (dont il ne reste plus rien).

"Nouveau plan de la Ville de Paris en 12 arrondissements (1840)" L'entrée des Catacombes localisée au niveau de la Barrière de la Santé serait en fait une réminiscence du projet de Héricart de Thury, de créer un accès majestueux et monumental dans la "fosse aux Lions", ancienne exploitation de calcaire grossier à ciel ouvert. Mais il est vrai qu'une fois dans le réseau des carrières du 14^e arrondissement, rien (aucun mur) n'empêchait à l'époque de pénétrer dans l'Ossuaire municipal.

■ Les frontières actuelles de l'au-dessous de la capitale

Actuellement, les entrées permettant d'accéder aux "carrières de Paris" sont donc pléthoriques, même si la très grande majorité d'entre elles sont ou condamnées (par soudure) ou cadennassées (très peu); leur nombre est néanmoins fluctuant, certaines apparaissant à la faveur de chantier ou réapparaissant suite à des travaux de voirie. Si l'on en croit le commissaire Pradier intervenant dans "L'Affaire du Collier" de Edgar P. Jacobs⁽¹⁵⁾, ce ne sont pas moins de "217 puits d'accès dans le réseau des anciennes carrières" : puits simples ou équipés d'échelons – dénommés plus exactement crampons – recouverts par un tampon faisant penser à une "vulgaire" plaque d'égout, mais qui en sont clairement identifiables. Cette quantité n'est rien par rapport aux 30 000 bouches d'égouts des rues de Paris, une en moyenne tous les 50 mètres.

Boucliers lentement patinés, sous les intempéries et le soleil ils luisent doucement et nous montrent la couleur du ciel, eux qui (c)ouvrent le passage vers la profondeur obscure par où nous évacuons ce dont nous n'avons plus cure.

Luc Chaumont⁽¹⁶⁾ - Vichy - France - Avril 1998

En faisant abstraction des anciens puits d'extraction dont on retrouve la trace sur les plans (de l'IDC, ou de surface; cf. supra), en omettant les puits de service à échelle (désigné par PSH sur les plans de circulation cataphiles, H n'étant bien évidemment pas l'initiale de "échelle" mais la symbolisation d'une échelle à un barreau⁽¹⁷⁾), en ne parlant pas non plus des simples PS percés par l'Inspection des carrières ou dépendant de particuliers, Émile Gérards nous fournit en 1908 une liste des autres moyens d'accéder aux galeries d'anciennes carrières souterraines de la Ville de Paris : les escaliers et quelques anciennes bouches de cavages.

De ces bouches de cavages il n'en subsiste bien sûr plus l'ombre d'une trace actuellement à Paris (en surface s'entend), tandis que si certains escaliers ont disparu depuis suite à divers travaux touchant l'urbanisme parisien, d'autres sont apparus, la majorité créés dans les années précédant le deuxième conflit mondial, pour mener aux abris de Défense Passive installés au niveau des carrières. Lorsque un bruit de bottes se fit entendre en provenance de "Germanie", on se mit en effet à craindre des attaques par bombardements avec l'emploi de gaz de combats, arme qui avait traumatisé même les populations les plus à l'abri

(14) Il est intéressant de noter que de nos jours, les clefs déposées dans différents commissariats et dans l'enceinte militaire du Val-de-Grâce, et permettant l'ouverture de cadenas condamnant des accès aux galeries de servitude de l'IDC, sont toujours étiquetées "Clefs des Catacombes" !

(15) Planche 13 de cette bande dessinée pour laquelle l'auteur E.P. Jacobs avait pris ses renseignements aux meilleures sources, puisque directement auprès de l'Inspection des carrières. Fidèle à sa réputation, il était même descendu sous Paris avec l'IDC, pour prendre des photos qui auraient dû lui servir de base documentaire pour réaliser les dessins de cet album.

(16) Strophe poétique extraite du site Internet de Luc Chaumont : <http://www.manhole-covers.net/> (Regards de Chaussée : de la fonte plein les yeux).

(17) Cette symbolisation est due à un célèbre cataphile des années 60' : Daniel Munier, auteur d'un non moins fameux plan, puis ré-éditeur en 1991 de l'incontournable "Paris souterrain", de Émile Gérards (la première parution datant de 1908 pour l'édition originale).



Extrait du “Plan des quartiers de Plaisance, Petit-Montrouge et de la Santé, de l’Enceinte fortifiée de la Ville de Paris”, établi lors de sa démolition en 1920. À l’intérieur de la boucle de retournement du métro au niveau de la station de métro porte d’Orléans, se remarque une descente de carrière, sur le bastion 80. Cette entrée était donc intégrée dans un édicule qui lui était propre. Il ne subsiste plus de nos jours de cet accès que la base de l’escalier. Le plan reproduit ici a été surchargé au moment de la démolition de l’enceinte, pour positionner les photos du reportage photographique réalisé à cette occasion.

de la zone de combat de ce qui devait être la “Der des ders”. Puis quelques autres accès (très peu) fut construits sous l’égide de la Régie municipale après guerre.

Et même tout récemment, en 1983, au numéro 1 de l’avenue Henri Rol-Tanguy un nouvel escalier d’accès aux “vraies Catacombes de Paris” fut creusé⁽¹⁸⁾. Il fait exactement 25 + 106 marches de profondeurs, la rupture ayant été causée par la découverte malapropos d’une galerie technique du métro lors du percement de cette entrée, qui vient alors tutoyer l’escalier de l’Inspection des carrières construit par la Défense Passive pour le service de l’IDC... et dont une partie a été amputée (par un rétrécissement) lors du percement de ce nouvel accès aux Catacombes ! Nul n’est prophète en son pays.

Des obscurs “combattants de l’abîme” aux passionnés “explorateurs urbains”⁽¹⁹⁾

On le voit, devant toute cette théorie d’accès, il n’est pas étonnant que de temps en temps certains aient pu transparaître sur des plans de surface. Principalement les entrées situées dans des édicules qui sont des servitudes de l’Inspection des carrières, et qui à ce titre sont représentés sur les plans comme de nombreux autres bâtiments de l’administration. Quant à la grande majorité des obscures, des sans grades de ces portes ouvertes sur les kilométriques arcanes des anciennes carrières

(18) Cet escalier circulaire remplace celui construit en 1799 pour les visites de l’ossuaire municipal ; situé dans le bâtiment en face, il faisait 90 marches pour une profondeur de 19 m 14. Ce sont encore bien souvent ses caractéristiques qui sont données dans les écrits évoquant les Catacombes de Paris... y compris dans des publications officielles ! Ce sont toujours les cordonniers les plus mal chaussés.

(19) Hier, “les obscurs et virils combattants de l’abîme” qui “sortent du puits à la brume, la lampe à la main...” évoqués par Louis Simonin, ancien Ingénieur des Mines de la Loire (en 1867), sont aujourd’hui remplacés par “Les bouillants et ingénieux explorateurs urbains” qui “entrent dans le puits la nuit, une lampe sur le front...” d’un hypothétique Simon Louisin, futur Ingénieur issu des Mines de Paris (en 2017).

“Chaque galerie souterraine correspond à une rue de la surface du sol, formant ainsi, dans ces profondeurs, une représentation déserte et silencieuse de la ville peuplée et bruyante qui s’élève au-dessus. Rien ne manque à cette représentation, à cette contre-épreuve de la capitale, pas même les murs d’enceinte et le service de l’octroi. Des murs d’enceinte ont été élevés à l’aplomb de ceux qui existent à la superficie ; car de hardis fraudeurs s’étaient fait dans les carrières des passages à couvert de l’inquisition municipale. Il a fallu y remédier ; et une ligne de murs, baptisés murs de la fraude, sépare les carrières intra-muros de celles de la banlieue.

[...] Toutefois on peut être assuré que la plus grande partie est reconnue et consolidée. On a pratiqué, de distance en distance, des puits de descente, qui permettent de les visiter à chaque instant et de les parcourir dans tous les sens. – Le plan indicatif ci-joint donne la situation de tous ces puits.

Outre ces escaliers et ces cheminées de descente, il existe encore d’autres moyens de communication entre les carrières et la surface du sol. [...] Les premiers niveaux d’eau constants sur la rive gauche de la Seine sont dans les couches d’argile plastique au-delà de la masse de pierre à bâtir. Aussi, partout où cette masse a été exploitée anciennement, les puits traversent les carrières pour chercher plus bas les sources qui les alimentent. Leur enveloppe de maçonnerie forme donc, dans les souterrains, autant de tours isolées dans lesquelles on a pratiqué des ouvertures, espèces de fenêtres qui servent à renouveler l’air des carrières et à faciliter les travaux.

[...] À ce nom de Catacombes, une foule d’idées lugubres, un sentiment vague d’effroi ne se réveillent-ils pas dans l’esprit ? Beaucoup de personnes parlent des Catacombes sans les connaître, absolument comme les enfants parlent de Croquemitaine et s’en effraient sans l’avoir jamais vu. Il y a dans leur nom une agglomération de syllabes si sombres, si retentissantes ; leur son sourd et prolongé peint d’une manière si pittoresque ce qu’il veut exprimer, qu’en l’entendant seulement prononcer, l’imagination se forme l’idée de quelque chose de triste et de grand. Pour nous en assurer, nous allons y descendre. – N’oubliez pas la petite bougie de sûreté, les allumettes chimiques, ou le prudent briquet phosphorique : double précaution fort innocente, mais dont le principal défaut est d’être parfaitement inutile... et partons !”*

in “L’Illustration, Journal universel” N°54. Vol.III. – Samedi 9 mars 1844 ; p. 19-22 : “Paris souterrain” (Suite et fin)

* Précaution pas si inutile que cela ni superfétatoire, si l’on songe à la mésaventure survenue à Philibert Atepaire, portier du Val-de-Grâce en 1793, qui fut victime de sa curiosité et de l’extinction de sa lumière, et dont on ne retrouva le squelette que près de onze années plus tard.

parisiennes, si elles sont discrètes tant sur le terrain que dans les plans de surface, elles n’en attirent pas moins dorénavant un public à la fois clandestin (car un décret pris le 2 novembre 1955 interdit ces “explorations” sub-parisiennes) et international, qui a fait le déplacement spécialement sur la capitale : Européens (Anglais, Néerlandais, Belges, Allemand, etc.), mais aussi Américains, Australiens, Sud-Africains, Russes.

- ■ ■ Ce qui constitue il est vrai un épi-phénomène mais néanmoins bien réel, décrit par le sociologue Jean-Didier Urbain dans un dossier "Tourisme culturel. Ne suivez pas le guide !": *"Le touriste est multiple. Il y a celui qui emprunte les grands circuits, qui ne s'enfoncé pas dans les villes, va de haut lieu en panorama, à la recherche du "texte" clair de la ville. C'est la logique d'Icare. Celle de Thésée, au contraire, suscite une approche fusionnelle. Son adepte cherche à s'immerger dans la pénombre du lieu, à découvrir la ville derrière la ville. Et puis cette obsession de ne pas paraître touriste pousse les voyageurs à toujours plus de détournements et d'esquives. Ils se font inventeurs d'un tourisme expérimental, alternatif"*. Ce qu'il appelle aussi le tourisme interstitiel, les voyageurs immobiles... voyage auquel peut donc nous convier la lecture attentive de certaines cartes. ●

Bibliographie succincte

"Armorial Général de la France", par L.P. d'Hozier et A.M. d'Hozier de Serigny (1738-1768), réimpression en fac-similé de Firmin Didot (1886);
"Projet de catacombes pour la Ville de Paris, en adaptant à cet usage les carrières qui se trouvent tant dans son enceinte que dans ses environs", opuscule anonyme, en vente dans les magasins de nouveautés (1782);
"Description des Catacombes de Paris (précédée d'un précis historique sur les Catacombes de tous les peuples de l'ancien et du nouveau continent)", par Louis Héricart de Thury (© Bossange et Masson 1815);
"L'Illustration – Journal Universel", N°54, Vol.III (du samedi 9 mars 1844): *"Paris souterrain"*, p.19-22, avec le Plan indicatif de l'entrée des entrées des catacombes et des carrières de Paris;
"Topographie et Consolidation des carrières sous Paris; avec une description géologique et hydrologique du sol et quatre plans côtés en couleur, à l'usage des ingénieurs, des architectes et des constructeurs", par J. T. Dunkel (© Des Fosse & Cie 1885);
"Paris souterrain", par Émile Gérards (© Garnier Frères 1908, ré-édité en 1991 par DMI);
"L'Affaire du Collier", aventure de Blake et Mortimer en bande dessinée, par Edgar P. Jacobs (1^{re} édition 1967);
"Les moteurs à muscles, cette énergie rétro", étude de 25 pages, par Simone Bleu (© Le Clairmirouère du Temps 1980);
"Réhabilitation du Treuil de Châtillon", par Michel Laurent, p.75-84, in Liaison SEHDACS n°5 (1985);
"Les carrières de Châtillon", étude de 24 pages de Robert Chardon (© PICAR 1985);
"Recueil de pièces manuscrites relatives à l'histoire des carrières de Paris au XVII^e et XVIII^e siècles", par le Groupe Parisien de Recherche sur les Souterrains Paris (© GPRS 1986);
"Catacombes et Carrières de Paris; promenade sous la capitale", par René Suttel (édité en 1986 par la SEHDACS, puis en 1993 par le PICAR);
"La Chartreuse de Paris", catalogue de l'exposition éponyme qui s'est tenue au musée Carnavalet du 12 mai au 9 août 1987;
"Les carrières de Clamart", étude de 34 pages de Robert Chardon (© PICAR 1991);
"Lumière et Carrières", préfacé par Georges Poisson (© éditions du Treuil 1992);
"Le treuil de carrière de Châtillon", étude de 27 pages de Gilles

Springmann (© PICAR 1995);
"Paris à vol d'oiseau", sous la Direction de Michel Le Moël, catalogue de l'exposition éponyme (© Délégation à l'Action Artistique de la Ville de Paris 1995);
"Histoire et dictionnaire des 300 moulins de Paris", par Alfred Fierro (© Parigramme 1999);
"Un Atlas parisien. Le dessus des cartes", par Antoine Picon et Jean-Paul Robert (© éditions Picard 1999);
"Atlas du Paris Souterrain", sous la direction de Alain Clément et Gilles Thomas, ouvrage récompensé par le prix Haussmann en 2002 (© Parigramme 2001);
"Les Plans de Paris, des origines (1493) à la fin du XVIII^e siècle", par Jean Boutier (© BNF 2002);
"Les plans de Paris. Histoire d'une capitale", par Pierre Pinon et Bertrand Le Boudec (© Le Passage 2004);
"L'épopée cartographique. 100 exemples de cartes qui ont dessiné le monde", sous la direction de John O. E. Clark (© Parragon 2006).

Remerciements

Les incontournables, non pas par ordre d'entrée en scène, ni d'importance, mais tout simplement alphabétique : Franck Albaret (qui gagne sur les trois tableaux !), Robert Chardon, Olivier Faÿ, Claude Huguet, Denis Prouvost et Mireille Skrzyerbak... Plus Dominique Paris pour la dernière visite contradictoire de vérification, ainsi que les "obscurs anonymes" qui se reconnaîtront : Bunny, Nexus et NoNo. Ainsi que le personnel des bibliothèques et autres dépôts de plans dont l'accueil n'a d'égal que la disponibilité : les Archives de Paris, la cartotheque de l'IGN, la Bibliothèque Administrative de la Ville de Paris, et la Bibliothèque Historique de la Ville de Paris. Mais aussi Laura Heisler qui sait toujours être là quand il faut... une longue histoire qui date de, oh là ! bien plus qu'il n'y paraît.

Contact

Gilles THOMAS

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

ABSTRACT

Numerous publications describe the limestone quarries that underlie Paris. Similarly, there is no shortage of studies of historical maps of the city. What hasn't been investigated, however, are the representations of these quarries on city and suburb maps. In this paper, I focus on the ways in which entrances to the quarries (wells used to extract stone), or to the galleries created by the General Inspection of the Quarries, are noted on maps from the XVIIth century to the present. Such notations can be thought of as a clandestine invitation to contemporary urban explorers to visit the illegal parts of the catacombs ! © LH

Les à-côtés de la topographie (Grandeur et servitudes de la profession)

■ Robert CHEVALIER

Lorsque, jeune diplômé, on entre dans la vie active, on rêve tous de participer à des travaux grandioses, dans le prolongement de ce qu'on nous a appris. Hélas, trois fois hélas, les travaux nobles comportent souvent des à-côtés bien terre-à-terre, qui peuvent surprendre et décevoir les débutants qui n'y ont pas été préparés ou qui en tout cas ne s'y attendaient pas.

On a eu l'occasion de dire que la topographie est un métier intellectuel qui se fait avec les mains (et avec les yeux ...). Il ne s'agit pas en l'occurrence, ce qui est une condition sine qua non, de la dextérité ou de l'adresse que requièraient dans les années 50 (maintenant tout est automatique !) la finesse d'un pointé, l'appréciation des appoints sur un vernier ou sur une mire, ni du coup de patte nécessaire au dessin d'un beau plan, avec ses écritures à la main, bien sûr ! Non, on veut seulement évoquer les basses besognes liées en ces temps-là, aux opérations de terrain qui laissaient aux praticiens un goût amer et des ampoules aux mains.

Quelques exemples concrets (qui n'en a pas connu ?) illustreront le propos

Un premier cas de figure : Dans les travaux de remembrement rural qui ont été pendant longtemps le fonds de commerce des cabinets de géomètres, l'ultime opération était la pose des bornes, en principe confiée à des aides recrutés sur place. Mais ensuite il fallait procéder au récolement, qui avait pour objet la vérification de la bonne implantation de celles-ci.

Ce travail se faisait alors à la chaîne de 50 mètres, celle-ci se retrouvant rapidement recouverte d'une gangue de terre de labour gluante qui la transformait en boudin informe.

On imaginera le plaisir éprouvé, lorsqu'il fallait dégager à mains nues ce magma pour lire les cotes... Mais surtout, il arrivait que des bornes soient mal positionnées (d'où l'utilité de ce travail) et alors là quelle galère ! Planter une borne est une chose, la déplanter en est une autre... On devait creuser autour, mettre les mains dans la glaise qui faisait ventouse, tirer, secouer et enfin extraire ce bloc de pierre d'un poids respectable qui résistait obstinément et le replanter au bon emplacement. La brigade étant limitée à deux géomètres, point de manœuvre pour vous aider dans ce travail à répéter n fois.



■ ■ ■ Sur certains chantiers, on devait parfois effectuer aussi la distribution des bornes près des points d'implantation, quand aucune entreprise ne pouvait s'en occuper. Il fallait alors charger, manipuler, décharger, poser près du bon emplacement des quintaux de bornes qui vous arrachaient la peau des mains. Par chance, il arrivait, dans les régions accidentées, que le Génie Rural, notre client, nous prêle un de ses DODGE 4x4, souvenir de la guerre, pour accéder au mieux à pied d'œuvre, nous facilitant ainsi grandement la tâche. Mais attention à ne pas prendre de risques en surestimant les capacités de ces puissants véhicules.

Petite parenthèse: Comme "récompense", de retour au bureau, il était de tradition que le dernier embauché soit responsable du bon fonctionnement de la chaudière à charbon (chargement, nettoyage...) personne n'y échappant durant les premiers mois de stage.

Passons à une autre activité: la géodésie telle qu'elle se pratiquait alors à l'IGN. Là c'était du travail de charpentier et de maçon. Il fallait équiper les points géodésiques de balises, les construire, les scier, les clouer, les ériger, parfois au sommet des arbres, ce qui vous transformaient en homme singe; puis là encore poser la borne, celle-ci d'un tout autre poids, faire du ciment, jouer les maçons. Heureusement les moyens étaient tout autres que chez les géomètres, il y avait du personnel ouvrier, mais peut-on rester les mains dans les poches en regardant les autres travailler? Tout le monde mettait la main à la pâte, récupérait des échardes et des ampoules! Quand il s'agissait de signaux de grande hauteur, tours Bilby par exemple, pouvant atteindre 30 mètres de haut, ou



d'échelles Durand pour la reconnaissance(jusqu'à 50 mètres) il y avait des monteurs spécialisés, mais là encore chacun donnait un coup de main (bonjour le vertige!). Naturellement en géodésie primordiale, les mesures se faisant de nuit, il fallait vivre sous la tente (ce qui était plutôt sympathique) près des points à observer, donc monter et installer le campement, s'occuper de l'intendance, mettre en place les projecteurs et les batteries sur les sommets à viser dans l'obscurité et accessoirement faire des tours d'horizon...

Enchaînons sur la topographie à la planchette. Cette fois, c'était la confection de piquets dans des morceaux de bois pour matérialiser les stations, et en cadeau pas de véhicule motorisé, juste des vélos fournis par l'administration, vestiges du SGA, totalement peints en kaki (sauf les pneus et le verre du phare, bien sûr!) avec un freinage par rétropédalage, qu'on ne maîtrisait qu'après quelques gamelles...

La planchette dans le dos, le jalon-mire et le trépied ficelés au cadre, ce n'était pas du gâteau, d'autant plus que la mer était proche, avec des vents violents et de bonnes côtes. Debout sur les pédales, la planchette faisant prise au vent, on regrettait amèrement les Jeeps de la géodésie...

Parlons maintenant de l'hydrographie, autre facette de notre métier si polyvalent

Outre les inconvénients de la vie en mer, quarts de nuit, promiscuité, mal de mer quasi permanent, on découvre que cette spécialité est un rude métier. Il fallait mettre à l'eau les embarcations de sondage (à la main, arc-boutés sur les manivelles) manipuler des bouées métalliques de 150 kg, les jeter par-dessus bord pour visualiser les zones de dragage, contrôler cette dernière opération avec des barres de test qu'on lançait comme des harpons, tout ça avec les mains au contact de l'eau de mer qui vous creusait les chairs. Heureusement on faisait (quand même) des mesures au cercle hydrographique et il y avait les missions de triangulation à terre, plus proches du métier de géomètre (petit privilège personnel) puis il fallait revenir aux contraintes de la vie de marin et aux tâches du service à bord.

Autre expérience, dans les Travaux Publics, vus sous l'angle des études de projets. Cette fois aussi et encore, on doit fabriquer des balises, des piquets et des jalonnets pour matérialiser les tracés, les assembler, les peindre (bis repetita placent!) mais le pire n'est pas atteint... Dans les zones boisées, on doit créer un layon pour permettre les visées et faciliter la progression des hommes. Théoriquement on embauche sur place des aides plus ou moins habiles, sauf en montagne où les villageois sont des experts en bûcheronnage et des bourreaux de travail. Malheureusement dans notre pays, pourtant rongé par le chômage, on trouve rarement des gens acceptant d'accomplir une tâche aussi rebutante et parfois périlleuse.

Alors, par nécessité, le topographe se transforme en bûcheron, manie la hache, le croissant, la serpe, puis des années plus tard la tronçonneuse. Outil très efficace, mais infiniment

dangereux, qu'il faut évidemment transporter en plus du matériel topo, avec ses accessoires, bidons de carburant, outils d'affûtage, etc. et ceci souvent dans des secteurs extrêmement accidentés.

Il reste quand même quelques domaines où le travail est propre, en particulier la topométrie urbaine. Ici pas de boue, pas de besoin de grouillot ! Mais rien n'étant parfait, un petit inconvénient: le danger d'opérer parmi les voitures qui vous rasant les fesses, lors de stations au milieu de la rue, mettant parfois en péril le personnel et le matériel, sans protection particulière.

Finissons en avec ces tâches parfois épuisantes, souvent salissantes et décourageantes, mais qu'il faut accomplir avec bonne humeur, pour souligner un dernier aspect des talents nécessaires pour exercer ce métier. Il s'agit de l'aptitude à la conduite de tous types de véhicules, compléments indispensables des opérations techniques. On dira: tout le monde sait conduire ! plus ou moins bien il est vrai ; certes mais le géomètre standard parcourt souvent et annuellement des milliers de kilomètres, par tous les temps, sur tous les types de chaussées, l'assimilant ainsi à un professionnel du volant.

Il doit progresser hors des sentiers battus, apprendre à ne pas s'enliser, dans le cas contraire savoir s'en sortir avec les moyens du bord. Il doit aussi pouvoir diagnostiquer et porter remède aux pannes usuelles (les garages sont parfois bien loin...) Il est également nécessaire de pouvoir utiliser efficacement les véhicules tous-terrains (surtout outre-mer) ce qui n'est pas aussi évident qu'on pourrait le croire, s'agissant naturellement du vrai hors-pistes, dans la gadoue, sur des sols détrempés voire inondés, qui n'ont rien de comparable avec les promenades au bois de Boulogne, terrain d'élection des 4x4 à la mode dont on se demande bien l'utilité.

A la lecture de ces quelques exemples, on peut se demander si le géomètre topographe n'est pas une sorte d'individu universel et touche-à-tout, si ce métier ne relève pas du masochisme et si davantage que le théodolite, ses outils indispensables ne sont pas la hache, le marteau, le pinceau et la clé à molette.

En fait, toutes ces activités basement matérielles ne sont que les corollaires incontournables des innombrables matières enseignées dans nos écoles et participent à la multitude d'activités qui ont besoin de la topographie sous toutes ses formes... En tout cas elles laissent aux intéressés des souvenirs marquants et originaux dans le bon sens du terme...

Bien évidemment ces aspects pratiques ne sont jamais enseignés. Ils s'acquièrent tout naturellement sur le tas et cette adaptation est grandement facilitée par des capacités individuelles d'adresse et de débrouillardise. En plus de ces qualités, on n'oubliera jamais la vigueur et la bonne forme physique, car le dénominateur commun à toutes ces disciplines est qu'il faut marcher, encore marcher, toujours marcher, parfois aussi escalader et souvent dans des terrains difficiles. En résumé dans notre profession, point d'empotés et point de mauviettes.

Mais plus gênant que la non-préparation à ces tâches manuelles ne serait-elle que psychologiques) de mon temps (comme disent les vieux) on n'apprenait ni les techniques commerciales, ni le management, pas plus que la juridiction sociale et les relations humaines, toutes choses indispensables à des techniciens de formation, appelés à évoluer vers des postes à responsabilités, dans lesquels la science s'efface au profit des aptitudes à diriger, à gérer, à administrer, à négocier. Tout ceci étant particulièrement vrai dans le secteur privé.

Je ne sais si cela a changé, mais c'était jadis une grosse lacune, à laquelle encore une fois il fallait pallier de son mieux par ses qualités personnelles, au premier plan desquelles je placerai une petite dose d'intelligence accompagnée de beaucoup de bon sens et de bonne volonté, valeurs en voie de régression semble-t-il... L'ordinateur n'est d'aucune aide dans ce domaine !

Avoir une bonne connaissance de la technique, c'est indispensable et c'est même le fondement de nos actions, ne pas savoir la gérer et la vendre peut être catastrophique. ●



Roland Goeschl : bleu,

■ Jean-Pierre MAILLARD

Capitale de l'Autriche, Vienne évoque la musique, le règne multiséculaire des Habsbourg et Sigmund Freud. Côté peinture, Vienne est surtout réputée par des créateurs de l'Art nouveau réunis dans la "Sécession autrichienne" initiée en 1897 par Gustav Klimt tôt rejoint par Egon Schiele ou encore Oskar Kokoschka, tous trois les représentants majeurs de l'expressionnisme dans leur pays.

Ordonnée autour de la cathédrale, la cité foisonne de palais, d'édifices prestigieux et de monuments innombrables. Offrant une belle perspective sur le cœur de ville, les palais du Belvedere réunissent les collections du Prince Eugen et une part significative des œuvres d'artistes autrichiens ou ayant travaillé en Autriche. Le Prince Eugen, précisément Eugène de Savoie-Carignon découragé dans ses ambitions françaises par Louis XIV, s'était rapidement mis au service de l'Empereur. Après de lui il se révéla un grand homme de guerre et fit fortune. Les palais du Belvedere en attestent par leur architecture, les jardins baroques et les collections même si elles se sont enrichies depuis la mort du prince en 1736. C'est tout particulièrement le cas des œuvres des peintres de l'Art nouveau autrichien qui terminent d'ailleurs la chronologie des présentations. Dans ce contexte, l'exposition temporaire "Passage Belvedere" de l'été 2006 consacrée à Roland Goeschl, maître de l'abstraction géométrique en Autriche est d'autant plus marquante.

Le Passage "Belvedere"

Le Passage Belvedere se présente sous la forme d'une installation de quatre grands volumes à dominante prismatiques, à faces planes et à pans coupés, taillés dans des blocs de matière plastique, spécialement réalisés pour la rétrospective "Goeschl 2006". La claire et vaste entrée du palais Belvedere supérieur est riche d'atlantes en pierre, de murs ciselés et d'une blanche voûte en stuc. Les surfaces planes, verticales ou quasi verticales de la composition contemporaine accrochées aux colonnes sculptées contras-

taient avec l'exubérance baroque par leurs lignes épurées ou encore leurs couleurs flashantes. La perception du lieu est modifiée d'autant que l'agencement des blocs crée une sorte de défilé de quatre mètres de hauteur par lequel tous les visiteurs devaient passer.

Chaque face est peinte d'une couleur différente caractéristique de la palette de l'artiste qui se limite à l'emploi des couleurs bleu, jaune, rouge et du noir. Ce choix délibéré, appliqué depuis plus de quarante ans par l'artiste, identifie sa production et ses interventions plastiques. Ainsi on devine du premier coup d'œil un ouvrage de Roland Goeschl, comme on reconnaît le drapeau d'un pays à ses couleurs.

De même qu'il ne se lasse pas de répéter à l'infini les couleurs qu'il a choisies, il ne se lasse pas non plus de remettre sur son métier un sujet récurant tant que cela lui paraît nécessaire.

Le Passage Belvedere en est une illustration puisque certaines parties de l'ensemble reprennent des volumes complexes déjà aménagés de façon différente dans plusieurs endroits. L'artiste a ainsi notamment installé en 1967 la "Sackgasse" – Cul de sac – dans un square de la ville de Graz puis, en 1971, la "Farbstrasse" – Rue en couleurs – dans un parc de la ville d'Essen. Et dans les perspectives dessinées par l'accordéon des surfaces, Roland Goeschl recherche un jeu d'opposition colorée qui crée un effet d'optique, une illusion visant à donner une impression constante de mouvement. Dans ses sculptures il génère une dynamique produite par l'action suggestive des surfaces géométriques peintes et la succession des angles formés entre-elles.

Roland Goeschl

Roland Goeschl est né en 1932 à Salzbourg où il a suivi des études d'arts plastiques. Son maître restera Fritz Wotruba même s'il vénéra aussi Giacometti. Ce n'était d'ailleurs pas du goût de Wotruba qui lui déclara : "Ton maître je suis". Jusque dans les années soixante, son expression est encore figurative même si l'attrait pour l'abstraction est grandissant. Ses peintures et sculptures s'épurent alors jusqu'à ne mettre en évidence que la structure des sujets et modèles. En 1964 il réalise pour la première fois des figures polychromes en bois et c'est à ce moment que son travail s'inscrit dans la tradition du constructivisme. On peut dire que l'image classique de l'homme comme thème s'efface devant l'étude du mouvement qui l'occupe de façon de plus en plus intensive. Il se voit à cette période comme un "bon ouvrier" de l'abstraction géométrique à l'unisson des artistes d'avant-garde russes et hollandais de l'époque.

Ce faisant il devient le représentant le plus important de l'Art concret en Autriche. A défaut d'avoir défini une théorie artistique pour ses productions, à mi-chemin entre maquettes et modèles, celles-ci tiennent lieu de manifeste, et montrent ce qu'il veut faire et ce qu'il fait. En 1969, les efforts analytiques de Goeschl dans l'espace et la plastique atteignent un sommet dans son installation pour le musée du XX^e siècle à Vienne. A l'extérieur, il met en place une "montagne" de parallélépipèdes de toutes tailles, aux couleurs limitées à sa palette de base. L'ensemble des volumes est comme jeté depuis le toit de l'édifice sur les façades et les terrasses, et se perçoit comme la lave ludique d'un volcan. Depuis ses sculptures ne prennent plus l'allure d'objets aboutis et figés mais mutent en une sorte de "chantier en cours". C'est une façon de chambouler les rapports convenus. En effet il ne s'agit plus d'art dans la construction mais d'un art transformant la construc-

jaune, rouge et du noir



© Galerie Belvedere

tion dans la recherche d'une nouvelle dimension pour l'architecture.

L'artiste ne cesse pas de se poser des questions :

- "Qu'est-ce que la sculpture ?"
- "Que se passe-t-il quand la couleur colle à la sculpture ?"
- "Comment réagit la partie couleur ?"
- "A partir de quel moment la polychromie détruit-elle la sculpture ?"

Les réponses sont pour l'essentiel dans les œuvres et tiennent compte des pratiques et des conclusions suivantes :

- La couleur est calculée, intégrée dans le projet.
- La couleur est un gain pour la sculpture ou alors un moyen de marquer le caractère superficiel de l'œuvre.

- La mise en place des volumes fait l'objet d'un aménagement rythmé et réfléchi dans le sens d'un grand mouvement sachant que les couleurs rendent les constructions sculpturales plus faciles à comprendre.

- La couleur dématérialise la forme en constituant un phénomène optique dans la sculpture.

Dans cet esprit, le critique Erich Link trouve que l'artiste sait créer une atmosphère dans la ville. Celle-ci apporte aux habitants non seulement un nouvel environnement mais aussi un sentiment nouveau face à la vie jusqu'à leur faire, pense-t-il, ressentir leur vie autrement. A sa manière Roland Goeschl contribue à la réforme de la société tout

en se défendant de faire de la politique qu'il dit ne pas l'intéresser. Depuis 1990 il concourt implicitement au développement du lien sculpture-architecture dans le monde, et défend inlassablement le rôle structurel de la peinture. Aujourd'hui il vit et travaille à Vienne.

Avec son goût des briques démesurées et multicolores, sa façon de les empiler de manière rigoureuse comme on monte un mur au dessin régulier ou, au contraire, de les entasser de façon désordonnée, Roland Goeschl se révèle parfois presque plus bâtisseur que sculpteur. C'est donc avec bonheur que l'élégante architecture du Belvedere a accueilli un artiste contemporain remarquable. ●

La saison des pluies (été) et la saison pluvieuse (hiver)...

■ François BODIN

C'est ainsi que les villageois d'AMBINANINDRANO caractérisent leur région, celle de ce petit village malgache au sud d'Antananrivo, plus exactement entre Antsirabe et Fianarantsoa.

Village éloigné de tout puisqu'il faut 17 heures de camion pour l'atteindre depuis Ambositra, distant pourtant de seulement 60 kilomètres... le trajet n'ayant lieu qu'un jour sur deux du fait de l'étroitesse de la piste qui interdit tout croisement.

L'alcool issu de la distillation de la canne à sucre, sorte de rhum artisanal, constitue la seule production que les habitants parviennent à commercialiser, les difficultés d'accès ruinant tout bénéfice qui pourrait être tiré d'autres cultures.

Loin des voies de communication et des réseaux d'énergie, les villageois ont difficilement accès aux soins, à l'éducation et à l'hygiène alimentaire.

Répondant à l'appel de cette population, les Sœurs de Fatima, congrégation religieuse autochtone basée à Antsirabe, ont décidé d'installer un petit complexe sur un terrain de 4 hectares au voisinage du village, comprenant outre leur couvent un bâtiment d'aide scolaire et à l'enfance, un dispensaire, un centre d'éducation à l'hygiène et un ensemble agricole et piscicole à vocation d'éducation aux pratiques orientées "développement durable" (en particulier vis à vis de la déforestation) tout en permettant leur autonomie alimentaire.

"Gégeo", chef d'entreprise français maintenant jeune retraité, a décidé de mettre ses compétences au service de cette entreprise en recherchant des financements en France et en aidant les sœurs dans leur installation à Ambinanindrano et dans d'autres projets dont la construction de collège à



Antsirabe et c'est ainsi que depuis 3 ans maintenant GSF et Géo-Topo International lui apportent leur soutien. En 2006 notre ami Gégeo avait besoin, outre des plans topo, de la collaboration d'architectes pour préparer les constructions à prévoir en matériaux locaux ; pour répondre à cette demande les élèves ESGT sont entrés en contact avec les étudiants de l'association "Villages Verts" de l'Ecole Nationale d'Architecture et de Paysages de Bordeaux dont deux membres les ont rejoint sur place, ainsi qu'un étudiant géomètre-topographe malgache: "dans ce petit village reculé nous avons vécu en immersion totale. Nous étions coupés du reste du monde: sans eau courante, sans électricité, sans couverture réseau. Nous avons vécu avec et comme des malgaches. Les équipements étaient rustiques mais nous suffisaient amplement. Nous avons été très bien accueillis par la population et par les



Sœurs, les malgaches étaient toujours prêts à nous aider. En plus de la découverte d'une nouvelle culture et d'un nouveau mode de vie, nous avons travaillé main dans la main avec les architectes ; nous avons échangé nos savoir-faire et nos compétences au service de la population du village." (extrait de compte rendu de mission).

Laissons le mot de la fin à Gégeo lorsqu'il a reçu les documents: "un magnifique travail qui correspond parfaitement à ce que j'en attendais... que les étudiants à force de persévérance aient finalement pu réaliser cela dans la marmite est un véritable exploit". (marmite : surnom donné à la zone du village ...).

Que ces mots rejoignent tous nos partenaires qui rendent possible ces missions financièrement d'une part et techniquement par le prêt de matériel d'autre part, qu'ils soient assurés de nos volontés communes de mener à bien les échanges prévus en 2007 avec Madagascar: réception et prise en charge d'un étudiant malgache pour son TFE, poursuite des missions avec les architectes. Nous allons cette année tenter d'ajouter le partage de ces missions avec des élèves d'autres écoles françaises d'ingénieurs géomètres et l'accompagnement en début de séjour de l'équipe étudiante par un "ancien", histoire de souder nos métiers et nos générations. ●