



Éditée par l'Association Française de Topographie  
**n° 116**



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

**THERMOGRAPHIE**  
Téledétection et cartographie :  
des outils au service  
de la thermographie aérienne  
Page 52

# Métrologie appliquée à l'expérience CMS au CERN

## 10 années de photogrammétrie numérique

**Directeur des publications**  
André Bailly  
Ingénieur Géomètre ETP, Paris

**Directeur adjoint des publications**  
Jean-Baptiste Henry  
Ingénieur LNE, Trappes

**Rédaction et administration XYZ**  
107, rue La Boétie - 75008 Paris  
Tél. 01 43 98 84 80  
Fax 01 42 25 41 07

**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  
Professeur des universités  
Directeur ENSG - Marne-la-Vallée  
Tania Landes  
Maître de Conférences  
INSA de Strasbourg  
Emmanuel Natchitz  
Ingénieur Géomètre ETP, Cachan

**Responsable du site Internet**  
Tania Landes

**Publicité** : Samuel Guillemain  
Tél. : 06 72 12 08 97  
communication@aftopo.org

**Conception et maquette**  
Dorothée Picard

**Autre publication** : L'annuaire de l'AFT

**ALBEDIA IMPRIMEURS**  
137, avenue de Conthe  
BP 337 15003 Aurillac Cedex  
Tél. : 0471 63 44 60  
Fax : 0471 64 09 09

**Dépôt légal**  
3<sup>e</sup> trimestre 2008 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP : 01 11 G 80 866

**Tirage de ce numéro** : 1 600 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 €, sauf à utiliser l'identifiant international de compte IBAN  
FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048  
Le numéro : 23 €  
Membre du SPCS Syndicat de la Presse Culturelle et Scientifique

Le bulletin d'adhésion est en p. 72

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.

Couverture : Partie centrale de l'expérience CMS avant l'insertion du détecteur central.  
© CERN

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres)   
107, rue La Boétie - 75008 Paris - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 42 25 41 07

Courriel : [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) • Site Internet : <http://www.aftopo.org>

## Editorial ..... 5

## Info-Topo

> Les informations de la profession ..... 7

## SIG

> Infogéo68  
*Jean-Pierre MAILLARD* ..... 13

## Manifestation

> XXI<sup>e</sup> Congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection : Pékin 3-11 juillet 2008  
*Pierre GRUSSENMEYER - Laurent POLIDORI* ..... 16

> Festival international de Saint-Dié-des-Vosges 19<sup>e</sup> édition du jeudi 2 au dimanche 5 octobre 2008  
*Jean-Pierre MAILLARD* ..... 22

> Les Rencontres de "Décider Ensemble"  
*Jean-Pierre MAILLARD* ..... 24

## La vie des écoles

> Le devenir du métier de photogrammètre  
*Laurent POLIDORI - Jean-Pierre MAILLARD* ..... 26

## Photogrammétrie



> Métrologie appliquée à l'expérience CMS au CERN 10 années de photogrammétrie numérique  
*Jean-Frédéric FUCHS - Raphaël GOUDARD*  
*Christian LASSEUR - Jean-David MAILLEFAUD*  
*Aurélié MAURISSET* ..... 29

### Prix AFT 2007

## Topographie

> 3<sup>e</sup> prix du concours AFT 2007  
Positionnement de puits déviés  
Implémentation des corrections à envisager lors de la représentation des trajectoires de puits déviés en projection cartographique - Propositions et analyses de trois méthodologies possibles.  
*Antoine BILLAULT* ..... 44

## > PRIX AFT 2007 RÉSUMÉ DES ARTICLES NON PRIMÉS



**Lasergrammétrie** - Relevé lasergrammétrique et traitement des nuages de points de moulages de la Gypsothèque de l'Université Marc Bloch de Strasbourg  
*Cyril CALLEGARO* ..... 49

**Photogrammétrie** - Redressement et mosaïquage : mise en place d'une chaîne de production et nouveau procédé  
*Clément BROSSARD* ..... 50

**Lasergrammétrie** - Etude relative aux méthodes de mise en œuvre et à la précision du scanner laser RIEGL LMS Z420i dans le cadre des travaux topographiques d'EDF  
*Carine HONORÉ* ..... 51

## Thermographie

> Télédétection et cartographie : des outils au service de la thermographie aérienne  
*Matthieu LEFEBVRE* ..... 52

## Histoire

> La méridienne de France et sa prolongation jusqu'aux Baléares  
*Pierre BAYART* ..... 58

## Topo-vécue

> Le programme de Schut déclenche l'alerte à Montréal  
*Jean TARIEL* ..... 63



## Art et Géométrie

> Aurélié Nemours  
Alignement du XXI<sup>e</sup> siècle  
*Jean-Pierre MAILLARD* ..... 64

## GSF

> Géomètres Sans Frontières, le changement dans la continuité  
*Claire GALPIN* ..... 66

## Récréation Cosmographique

> *Raymond D'HOLLANDER* et *Paul COURBON* ..... 67

**Livres** ..... 70

Pour la recherche de nos annonceurs consulter la page 71.

**PROCHAIN XYZ - n° 117**  
Evaluation du module d'erreur de capteur MENS-IMU

La communauté scientifique est en alerte : l'actuel lancement du "Large hadron collider" (LHC), en français le Grand collisionneur de hadrons<sup>(1)</sup>, et de ses quatre expériences associées mobilisent son intérêt et plus particulièrement celui de tous les physiciens. Imaginée dans les années 1980, la machine la plus gigantesque jamais réalisée par l'homme est implantée sur le site du CERN, le principal laboratoire de physique du monde, près de Genève. Depuis son adoption par l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire en 1994, elle procède du travail de milliers de chercheurs et d'ingénieurs de nombreux pays, notamment ceux du CNRS. D'un coût de trois milliards d'euros, le LHC est le plus grand accélérateur de particules connu. Fortement engagée dès l'origine la France finance 16,33 % du programme. Projet unique en son genre, le LHC devrait révolutionner l'approche et la connaissance de l'infiniment petit précisément les constituants des noyaux des atomes, comme celle de l'infiniment grand en reposant les questions sur la nature de la matière, du vide, de l'espace, du temps et sur les lois qui régissent l'Univers depuis sa naissance, au moment du Big Bang.

Bientôt, dans un tunnel en forme de tube circulaire de 27 km de circonférence, des milliards et des milliards de particules seront accélérées dans les deux sens de rotation à une vitesse proche de celle de la lumière et leurs collisions organisées en quatre points de l'anneau justement au droit de quatre détecteurs respectivement nommés Atlas et CMS, Alice et LHCb. Les deux premiers, les plus importants, sont affectés à la recherche de nouvelles "particules" encore hypothétiques tels les bosons de Higgs dont l'existence, postulée depuis 1964, reste à prouver comme chaînon manquant responsable de la masse. Alice est chargée de la recherche d'un nouvel état de la matière appelé plasma de quarks et de gluons. Enfin, LHCb devrait permettre de mieux comprendre pourquoi l'Univers est constitué de matière plutôt que d'antimatière. Pour faciliter la circulation des protons à des énergies de 7 TeV<sup>(2)</sup>, il est indispensable de créer dans l'espace torique un froid et un vide extrêmes, respectivement une température de  $-271,3$  °C et une pression d'un dix-millième de milliardième d'atmosphère. Dans ces conditions, quarante millions de collisions sont attendues chaque seconde, les deux premiers détecteurs étant capables de repérer chaque collision. C'est dire la performance de l'informatique et des systèmes d'acquisition des données dont on dit qu'ils traitent autant d'informations que tout le réseau européen d'aujourd'hui.

La mise en place de la colossale machine a nécessité pour l'accélérateur un savoir-faire en métrologie, en photogrammétrie numérique et la maîtrise de précisions exceptionnelles. Aussi en participant à la localisation de l'ouvrage et de tous ses composants les professionnels concernés ont mis leurs connaissances et leurs compétences au service de la physique moderne. C'est pourquoi XYZ est reconnaissant à Jean-Frédéric Fuchs, Raphaël Goudard, Christian Lasseur, Jean-David Maillefaud et Aurélie Maurisset, mobilisés et encouragés par Pierre Grussenmeyer, d'avoir bien voulu, dans un article complet sur l'équipement CMS, restituer la méthodologie appliquée, les moyens et les résultats de leurs interventions tout au long des dix années la construction et de l'assemblage du dispositif jusqu'au contrôle final. La réussite de leurs mission et mandat valorise l'unité "Métrologie des Grandes Dimensions", dont le responsable actuel, Jean-Pierre Quesnel est le successeur de Michel Mayoud membre très actif de l'AFT, en étant tout autant due au "management" de CMS.

Avec ce numéro d'XYZ nous en saurons plus sur les avancées de la métrologie et de la photogrammétrie à grande échelle dans une application spécifique. En revanche il nous faudra attendre encore un peu pour s'étonner de la découverte de nouvelles particules qui composent l'atome tout en sachant que notre impatience pourrait désormais être bientôt satisfaite... Bien sûr, les colonnes d'XYZ restent ouvertes à nos collègues du CERN pour tenir ses lecteurs informés du fonctionnement de l'accélérateur et des résultats à venir.

Jean-Pierre MAILLARD

(1), (2) Voir page 39.

## ■ Autodesk rejoint le programme Citrix Alliance et AutoCAD Map 3D reçoit la certification "Citrix Ready"

En rejoignant le programme Citrix Alliance, Autodesk, Inc. permet aux utilisateurs d'AutoCAD Map 3D d'améliorer les performances de leur application, de centraliser la gestion des logiciels, de réduire les coûts liés aux stations de travail et de garantir la confidentialité des données, tout en bénéficiant de l'avantage d'une expérience utilisateur optimale.

Autodesk a également annoncé qu'AutoCAD Map 3D 2009 avait passé avec succès les tests de validation pour Citrix XenApp dans le cadre du programme Citrix Ready.

Ce processus de vérification a été conçu pour identifier et mettre en avant les produits partenaires du programme Citrix Alliance et simplifier la sélection de logiciels pour les utilisateurs Citrix, qui pourront désormais déployer AutoCAD Map 3D. Les données des utilisateurs d'AutoCAD Map 3D résideront sur des serveurs Citrix, pour une sécurité accrue, des coûts réduits et jusqu'à 30 % de retour sur investissement en plus. Citrix Alliance réunit plus de 1800 fabricants de matériels, éditeurs de logiciels et fournisseurs de services qui complètent et prolongent l'infrastructure de livraison d'applications Citrix.

► **Pour plus d'informations :**  
[www.autodesk.fr](http://www.autodesk.fr)

## ■ Grand succès pour la conférence utilisateurs STAR-APIC du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord en Syrie

Afin de mettre ses clients à l'honneur, STAR-APIC a organisé sa première Conférence des Utilisateurs du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, à Damas, en Syrie.

La Conférence, organisée avec SEMPLISOFT, l'Ambassade Belge en Syrie et la Délégation Économique et Commerciale de Belgique à Damas, s'est déroulée à l'hôtel CHAM Palace du 15 au 17 juin 2008.

Avec plus de 200 participants lors de l'ouverture de la Conférence, STAR-APIC envisage d'organiser très prochainement une deuxième édition.

► **Pour plus d'informations :**  
[www.star-apic.com](http://www.star-apic.com)

## ■ Conférence utilisateurs STAR-APIC le 23 septembre 2008

STAR-APIC, éditeur de logiciels SIG et d'applications métier, propose à ses utilisateurs et partenaires son "événement francophone STAR-APIC", qui se tiendra le mardi 23 septembre 2008, à l'Élysées Biarritz, à Paris. La matinée sera consacrée à un ensemble de retours d'expériences institutionnels et méthodologiques autour d'usages opérationnels des solutions STAR-APIC dans différents domaines d'activité. La session de l'après-midi sera entièrement animée par STAR-APIC et permettra de présenter la stratégie de développement des produits du groupe. A l'issue de la rencontre, un cocktail de clôture sera organisé, suivi d'un dîner de gala ponctué d'animations artistiques. Un point presse sera mis à la disposition des journalistes.

► **Pour plus d'informations :**  
[www.star-apic.fr](http://www.star-apic.fr)

## ■ Lancement réussi du satellite Jason-2

Le satellite Jason-2, développé en coopération entre la NASA et le CNES, en partenariat avec Eumetsat et la NOAA, a été placé en orbite avec succès par le lanceur Delta II depuis la base de lancement de Vandenberg en Californie. Jason-2 a ainsi rejoint son prédécesseur Jason-1, opérationnel depuis fin 2001, sur la même orbite, se positionnant derrière lui, en vue de procéder à la comparaison des deux missions, pendant environ six mois. Jason-1 sera ensuite déplacé sur une orbite intermédiaire pour augmenter la couverture géographique des mesures sur l'océan. Jason-2 arrive dans la continuité de Jason-1 et de Topex-Poseidon, développés et lancés dans le cadre d'une coopération fructueuse en matière d'altimétrie océanographique entre la France et les États-Unis, menée depuis 25 ans entre le CNES et la NASA. Et, au-delà, grâce à la nouvelle technologie de "poursuite en boucle ouverte" embarquée sur Jason-2, les champs d'investigation de l'altimétrie, l'un des domaines d'excellence de la France, vont être élargis aux eaux continentales, aux lacs et aux grands fleuves, la mettant ainsi au service de l'hydrologie. Jason-2 est aussi le fruit d'un partenariat élargi aux organismes utilisateurs que sont EUMETSAT et la NOAA, son homologue américain. Grâce à ce système les modèles altimétriques existants vont être affinés, le modèle économique

des prochaines générations infléchi car les données seront distribuées à l'ensemble des demandeurs.

► **Pour plus d'informations :**  
[www.cnes.fr](http://www.cnes.fr)

## ■ Leica ALS60 et Leica RCD105: Une fréquence d'impulsions "Au sol" de 200 kHz avec un appareil photo numérique moyen format adapté

**Le Leica ALS60 fournit des données précises plus rapidement**

Le système LIDAR Leica Geosystems de troisième génération, le Leica ALS60, garantit la précision des données acquises quelle que soit la fréquence d'impulsions, dépendant uniquement de l'altitude de vol. Sa gamme d'altitudes de vol s'étend de 200 m (compatible avec l'utilisation d'un hélicoptère) à 5000 m pour la cartographie de grandes surfaces. Aujourd'hui plus que jamais, le Leica ALS60 redéfinit les performances de la cartographie avec un système LIDAR.

**Une intégration parfaite du nouvel appareil photo moyen format : le Leica RCD105**

Le Leica RCD105, disposant de 39 mégapixels, est conçu comme une solution aéroportée et peut être utilisé sur terre et dans les airs. Il s'intègre parfaitement aux systèmes LIDAR de la série ALS de Leica, de la planification des missions à l'exploitation du système et au traitement d'images.

Les avantages de cette conception spéciale pour les systèmes aéroportés comprennent une parfaite conformité aux spécifications environnementales applicables aux systèmes aéroportés concernant la température, les chocs, les vibrations, les interférences électromagnétiques et radiofréquences (IEM/IRF). En outre, une seule commande peut enregistrer les données de deux appareils photos, ce qui permet l'acquisition simultanée d'images en couleurs naturelles et en fausses couleurs infrarouges. Peu importe les préférences de couleurs, le Leica RCD105 est disponible avec divers objectifs. Grâce à la fréquence d'images rapide du système, l'appareil peut être paramétré pour des performances optimales pour toutes les applications. Autre caractéristique unique de cet appareil photo, l'utilisateur peut remplacer l'obturateur lui-même, ce qui réduit les besoins de maintenance hors-site.

► **Pour plus d'informations :**  
[www.leica-geosystems.com/fr](http://www.leica-geosystems.com/fr)

## COMITÉ DE LECTURE

**BAEHR Hans-Peter**, Université de Karlsruhe  
**BAILLY André**, Ingénieur ESTP  
**BILLEN Roland**, Université de Liège  
**BORDIN Patricia**, ENSG  
**BOTTON Serge**, ENSG  
**BOURGOIN Jean**, Ingénieur Général Hydrographe  
**BRETAR Frédéric**, Laboratoire MATIS, IGN  
**CHRISMAN Nicholas**, Université Laval, Québec  
**DEBARBAT Suzanne**, Astronome Observatoire de Paris  
**DISSARD Olivier**, ENSG  
**D'HOLLANDER Raymond**, Ingénieur Général Géographe, IGN  
**DONNAY Jean-Paul**, Université de Liège  
**DRAP Pierre**, Chargé de recherches CNRS  
**DUQUENNE Henri**, IGN  
**DUQUENNE Françoise**, IGN  
**DURAND Stéphane**, ESGT  
**FERHAT Gilbert**, INSA de Strasbourg  
**GRUSSENMEYER Pierre**, INSA de Strasbourg  
**HENO Raphaële**, ENSG  
**HOMBROUCK Laurent**, Ingénieur ENSAIS, Grenoble  
**KASSER Michel**, Directeur ENSG, IGN  
**KOEHL Mathieu**, INSA de Strasbourg  
**LANDES Tania**, INSA de Strasbourg  
**MAILLARD Jean-Pierre**, Urbaniste, Géomètre-Expert Foncier  
**MAYOUD Michel**, Ingénieur ESGT  
**MERMINOD Bertrand**, Professeur EPFL, Lausanne  
**MOREL Laurent**, ESGT  
**NATCHITZ Emmanuel**, ESTP  
**NICOLAS Joëlle**, ESGT  
**PANTAZIS N. Dimos**, Technological Education Institution (TEI), Athènes  
**POLIDORI Laurent**, Directeur de l'ESGT  
**RAVEZ Bertrand**, Bouygues TP  
**REIS Olivier**, Ingénieur ENSAIS  
**RIFFAULT Jacques**, Directeur Commercial  
**ROCHE Stéphane**, Université Laval, Québec  
**RUAS Anne**, Chef du Cogit, IGN  
**VINCENT Robert**, Ingénieur ECP  
**WILLIS Pascal**, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées

## ■ Le scanner laser 3D Leica au cœur de la construction du plus grand trimaran au monde !

Conçu dans le but de battre les plus importants records, le trimaran "Banque Populaire V" est composé d'une coque centrale de 40 m de long, de flotteurs de 37 m et d'un mât de 45 m. Pour la structure du Banque Populaire V, l'équipe technique a fait appel à une technologie éprouvée : une couche de Nomex (nid d'abeilles) entre deux couches de carbone. Les éléments de cet immense prototype risquaient de subir des déformations à la cuisson. C'est pour cela que la société ECARTIP a été chargée de la mesure et du contrôle des pièces du bateau par scanner laser 3D. L'objectif était de contrôler les écarts entre les pièces réalisées et le modèle numérique théorique pour constater d'éventuelles déformations et pouvoir agir en conséquence pour garder intacte la performance du bateau prévue par le plan initial.

Les flotteurs de 37 mètres de long ont nécessité 10 positions de scan chacun. Cette redondance de scans a permis à ECARTIP d'obtenir une précision de +/- 4 mm en assemblage de nuages de points et +/- 2 mm en modélisation. ECARTIP a ainsi pu fournir des coupes, des vues 3D, des rapports avec les écarts obtenus et des plans de récolement afin de contrôler la conformité des pièces du bateau. La modélisation des coques



leur a permis de redéfinir les axes et plans de symétrie réels du bateau. Les différentes parties du bateau ont donc pu être recalées précisément en tenant compte des déformations observées et des caractéristiques mécaniques du bateau. Cette opération de précision a été déterminante pour l'implantation des puits de dérive, foils, safran et autres pièces du bateau.

Auparavant, le guidage de l'implantation des éléments sur la coque centrale se faisait sur une projection au sol et à l'aide de fil à plomb et d'un niveau. Ce travail minutieux pouvait prendre des jours à être installé. Puis ils découpaient, positionnaient la pièce, puis répétaient ces opérations jusqu'à son intégration parfaite.

Le scanner a donc suivi toute la progression de l'assemblage du bateau en aidant à l'assemblage des coques et au positionnement des foils.

► **Pour plus d'informations :**  
[www.ecartip.fr](http://www.ecartip.fr)  
[www.voile.banquepopulaire.fr](http://www.voile.banquepopulaire.fr)  
[www.leica-geosystems.fr](http://www.leica-geosystems.fr)



## OFFRE D'EMPLOI

Le CERN (Centre européen pour la recherche nucléaire, à Genève) recherche un ingénieur géomètre pour la gestion de son SIG.

Se connecter sur le site du CERN pour de plus amples informations : <https://hr-dept.web.cern.ch/hr-dept/>

## ■ Topcon informe

### Une nouvelle série de stations totales

La série GPT-3100N remplace la série GPT-3000N chez Topcon. Les nouvelles stations totales sont dotées d'un nouveau système laser utilisant de multiples faisceaux laser à impulsions, émis à une fréquence constante afin de mesurer les distances. Cette série offre des performances de mesure accrues avec un faisceau de mesure ponctuel, une portée étendue, une précision supérieure et une consommation inférieure.

### Instruments et formation pour les sinistrés du séisme dans la province du Sichuan (Chine)

Les représentants de Topcon viennent de rencontrer des dirigeants de l'Administration du séisme de Wenchuan en Chine pour contribuer à la formation pour la recherche dans la prévision des séismes. Topcon (Beijing) Tech Co., Ltd et Beijing Topcon Business et Trade Co., Ltd ont également fait un don à la Croix Rouge chinoise afin de l'assister après le séisme du 12 mai. Des récepteurs de station de référence Odyssey-RS GPS+ et des antennes CR-G3 à triple constellation ont été mis à disposition pour ces recherches.

### Conférence d'utilisateurs orientée sur les solutions Imagerie

À Édimbourg en Écosse, les solutions Imagerie de Topcon ont fait l'objet d'une conférence d'utilisateurs. La gamme des produits

d'imagerie, incluant la Station topographique d'imagerie et le Scanner laser GLS1000, a été présentée aux clients utilisant déjà le logiciel Pi-3000. Le logiciel Image Master permet d'intégrer les avantages de la photogrammétrie, du balayage laser et des relevés de station totale.



Des utilisateurs ont exposé leurs propres expériences, parmi lesquelles :

- Historic Scotland qui a exposé les avantages de la modélisation/génération d'orthophoto sur les techniques de recodage conventionnelles ;
- English Heritage qui a présenté ses techniques de capture de données avec le Pi-3000 afin de modéliser un tunnel historique en danger d'effondrement.
- Des chefs Tanana d'Alaska ont présenté une solution de cartographie à grande échelle exploitant le Pi-3000 afin de topographier les limites de leurs terres depuis un hélicoptère.

► Pour plus d'informations : [www.topcon.eu](http://www.topcon.eu)

#### **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**

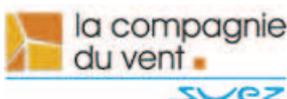
#### **Paul Newby**

*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***

## ■ L'énergie éolienne n'est pas du vent



Au printemps dernier, l'inauguration du parc éolien des Longs champs à Fienvillers (Somme) a donné à la Compagnie du vent l'opportunité de faire valoir que son action s'inscrit désormais dans celle du groupe Suez. En effet, depuis novembre 2007, la société est devenue filiale du groupe financier Electrabel acquéreur de 56,8% du capital. Cette concentration participe à la réalisation de l'engagement pris par la multinationale à l'occasion du Grenelle de l'environnement d'augmenter significativement sa capacité de production en électricité renouvelable (hydraulique, photovoltaïque, éolienne et biomassique) contribuant ainsi à l'objectif ambitieux, d'ici 2020, d'atteindre une part de 20% d'énergie renouvelable dans la consommation française totale. Cette volonté a été formalisée par la prise solennelle du groupe Suez de dix engagements professionnels et citoyens à l'appui de sa présentation vertueuse d'être une "entreprise internationale de services d'utilités publiques". Sans douter de la bonne foi du groupe Suez, il ne faudrait cependant pas qu'un écart de langage, ou un excès de communication, amène une confusion entre l'intérêt général auquel Suez participe sans conteste et l'utilité publique qui reste l'apanage régalié de l'Etat.

D'ores et déjà la part des énergies renouvelables du groupe représente 20,8% de ses capacités installées et en service dans le monde. En France, l'hydraulique représente 3 720 MW et l'éolien 130 MW. Avec cinq éoliennes pour plus de 8 MW supplémentaires, l'équipement de Fienvillers répond maintenant à la demande électrique annuelle de près de 10 000 personnes. Ces données sont à rapprocher de l'état actuel du parc national opérationnel des éoliennes à savoir 1 700 unités de production pour une puissance totale de 2 100 MW, auquel s'ajoutent comme déjà accordé, autant d'unités, soit un total de 3 400 unités pour 5 400 MW.

Le débat relatif au coût supporté par le consommateur de l'électricité éolienne et à l'impact des équipements sur le paysage n'est pas clos et reste nécessaire, sachant notamment que ce prix du KW fourni serait aujourd'hui cinq fois plus cher que celui de l'électricité nucléaire. On voit que la question de l'effort écologique supportable pour disposer de l'énergie est encore posée. S'agissant du paysage, tout est dans la mesure et le nombre car on ne peut pas dire qu'une éolienne soit inesthétique, encore moins polluante. Les enfants d'aujourd'hui auront toujours vu celles existantes à leur naissance et, avec une intégration réussie, on peut penser qu'elles feront partie de leur monde pour autant que leurs parents soient prêts à en payer le prix.

► Pour plus d'informations : [www.compagnieduvent.com](http://www.compagnieduvent.com)

## ■ Quelle est la distance précise entre le casino de Biarritz et le point Zéro des routes de France ?

Alors qu'il reste aujourd'hui une poignée de sites à trouver, TERIA est officiellement né le 18 juillet dernier, à Biarritz, là où le réseau a fait ses premiers pas avec l'expérimentation conduite en 2001. Pour marquer ce baptême, Jean Berterreche n'a pas ménagé ses efforts : une conférence de presse dédiée aux journalistes de la presse locale et nationale, une



présentation du réseau auprès d'une centaine d'invités, élus locaux, représentants du Cadastre, de l'IGN, entreprises locales, géomètres-experts, et les 4 constructeurs de GPS, Topcon, Leica, Magellan et Trimble. En marge de la journée étaient organisées des démonstrations avec le concours des fabricants de GPS, telles que la mesure en temps réel avec une précision centimétrique, de la distance entre le Casino de Biarritz et le kilomètre zéro des routes de France situé sur le parvis de Notre Dame (668 165 mètres) ou la recherche de louis d'or disséminés sur la terrasse du Casino de Biarritz dont on connaissait seulement les coordonnées géographiques.

► Pour plus d'informations : [www.geometre-expert.fr](http://www.geometre-expert.fr)

## JEU-CONCOURS

### "L'OBJET INSOLITE"

Le musée d'histoire naturelle Henri-Lecoq de Clermont-Ferrand possède un instrument mystère présenté à la fin du parcours de l'exposition "Si la mesure m'était comptée..." (c.f. XYZ n°115). Du 1<sup>er</sup> septembre au 30 novembre 2008, un jeu-concours ouvert aux scolaires et au grand public sans limite d'âge et d'imagination est organisé autour de cet instrument insolite.



Le jeu consiste à donner un nom à l'instrument, à décrire son fonctionnement, son histoire ou son utilisation par une expression écrite libre (récit, une notice d'utilisation, un poème, ou encore un article de presse)... puis décrire son utilisation au moyen d'une création artistique (dessin, peinture, collage...). La seule contrainte de réalisation est le format A4.

Le dépôt d'une production écrite associée à une production graphique est obligatoire pour valider la participation au jeu-concours, sans oublier de donner le nom de l'instrument. Un jury composé de personnalités du monde scientifique, littéraire et artistique décernera trois prix par catégories (scolaires et individuels). Les réalisations des lauréats seront alors présentées dans la salle d'exposition temporaire en février 2009. Une mention spéciale sera décernée aux personnes participant au concours qui trouveront le véritable nom de l'instrument et son utilisation.

Le règlement et les modalités du concours sont disponibles sur le site Internet ou à l'accueil du musée.

La date limite d'inscription est fixée au 30 novembre 2008 puis celle d'envoi ou de dépôt des travaux au 31 décembre 2008, au musée.

► Pour plus d'informations : <http://musee.lecoq.clermont-ferrand.fr>

## ■ Jean-Charles de Borda De la terre à la Lune - Une aventure scientifique au siècle des Lumières

Exposition depuis le 21 juin jusqu'au 30 novembre 2008 - Musée de Borda à Dax

Jean-Charles de Borda est présent à Dax à tous les coins de rue : rue Borda, lycée Borda... Il fait partie de ces cerveaux éblouissants de netteté. Il combine l'intuition, la rigueur, l'acharnement, la méthode. Son esprit est si largement ouvert que nous avons trouvé plus de 40 thèmes de recherche différents. Son intérêt le porte aussi bien vers l'hydraulique ou la pénétration dans l'air, que vers les méthodes de vote ou le fonctionnement des phares.

C'est aussi un brillant ingénieur. Il dessine lui-même des plans de navire, met au point des instruments d'une précision jamais atteinte auparavant. Il est un de ces rares hommes qui savent détecter les talents et les unir pour arriver au plus haut. C'est un organisateur né. Il fait appel aux plus grands artistes de l'époque : son cercle dit "Borda" est réalisé par Lenoir. Pour les modèles des nouveaux vaisseaux, il choisit Sané...

Nous avons ainsi passé une année à vivre avec Borda. Nous sommes devenus "Bordaphilles". Nous avons trouvé de nombreux documents : une carte des côtes africaines et des Canaries ayant appartenu à Borda, des ouvrages de l'Académie des Sciences dans lesquels Borda a présenté ses découvertes et même en édition originale le livre écrit par Delambre et Méchain relatant la mesure de la Méridienne. La municipalité de Dax a soutenu notre initiative en nous accordant un budget de 20000 euros.

Nous nous sommes rendus à Paris dans les lieux où Borda a travaillé pour dénicher des objets, jamais sortis de leurs murs. Nous présentons ainsi les règles de "Borda" conservées à l'Observatoire de Paris. Inventées par Borda, elles ont servi à définir la nouvelle unité de mesure, le mètre, en mesurant la Base de la Méridienne de 11,8 km entre Melun et Lieusaint avec 30 cm seulement d'erreur.

L'Institut Géographique National (IGN) nous a prêté le cercle répéteur de Lenoir qui a sans doute été utilisé par les astronomes Delambre et Méchain pour mesurer la Méridienne. [...]

Pour leur présentation, nous avons voulu que ces objets soient porteurs d'émotion et qu'ils nous racontent cette formidable aventure de la science. Pour cela, nous avons construit une mise en scène les mettant en situation. Dans cette exposition, nous avons



envie de faire aimer la science et l'histoire. Nous voulons vulgariser, donner envie. L'exposition s'adresse à tout public avec un contenu attrayant et une présentation dynamique. [...]

Extrait du discours de présentation de l'exposition par Béatrice Labat, conservatrice du musée.

► Pour plus d'informations : [www.dax.fr](http://www.dax.fr)

## ■ Leica ADS80 et Leica XPro

Leica Geosystems lance un nouveau capteur numérique aéroporté : le Leica ADS80, fournissant une précision subpixelique du bleu à l'infrarouge. Il existe deux configurations pour le nouveau capteur ADS80 : les têtes de capteurs SH81 et SH82, compatibles avec la plus grande variété d'applications géospatiales de l'orthophoto à la cartographie en 3D. Le traitement des données amélioré de la toute nouvelle unité de contrôle CU80 munie d'une mémoire flash MM80 facilite l'acquisition simultanée de données d'égale résolution dans toutes les bandes pour les applications de photogrammétrie et de télédétection.

De la préparation du plan de vol, avec le logiciel FPES de Leica,

à l'acquisition de données à l'aide des têtes SH81/82 puis à la livraison de données (grâce au nouveau programme de traitement des données Leica XPro, voir ci-dessous), le Leica ADS80 apporte une solution complète d'imagerie numérique aéroportée. Le "pan-sharpening" et les images virtuelles n'étant pas nécessaires, les capteurs linéaires de Leica Geosystems représentent une véritable alternative numérique simple pour les utilisateurs d'un logiciel traditionnel de traitement analogique.

Fruit d'une collaboration avec la société North West Geomatics Ltd., un nouveau système de traitement avancé des données a été développé : le Leica XPro. Le Leica XPro couvre toutes les étapes du traitement des données des capteurs

linéaires : du téléchargement des données à la génération d'images. Les outils de contrôle qualité peuvent indiquer que la mission d'acquisition des données se déroule avec succès dès le début du traitement des données. Le programme utilise le géo-référencement direct du système IPAS (Inertial position and attitude system) de Leica Geosystems. Leica XPro génère des images en vue stéréo ou des orthophotos haute résolution. Il est conçu pour restituer des images de façon quasi instantanée, avec un minimum d'intervention de l'utilisateur. Les possesseurs actuels du Leica ADS40 pourront évoluer facilement vers le nouveau système.

► Pour tout renseignement : [www.leica-geosystems.fr](http://www.leica-geosystems.fr)

## Agenda des manifestations

- **Du 17 au 19 septembre 2008 :**  
**Journées de la Topographie de l'INSA de Strasbourg et Congrès National de l'Ordre des géomètres-experts** à Strasbourg  
[www.insa-strasbourg.fr](http://www.insa-strasbourg.fr)  
[www.geometre-expert.fr](http://www.geometre-expert.fr)
- **Du 30 septembre au 2 octobre :**  
**Intergeo - Brême (Allemagne)**  
[www.intergeo.de](http://www.intergeo.de)
- **Les 1<sup>er</sup> et 2 octobre :**  
**12<sup>e</sup> Conférence Francophone ESRI - SIG 2008**  
Palais des Congrès de Versailles  
[www.esrifrance.fr/sig2008](http://www.esrifrance.fr/sig2008)  
[sig2008@esrifrance.fr](mailto:sig2008@esrifrance.fr)
- **Du 2 au 5 octobre 2008 :**  
**Festival international de géographie (FIG) de Saint-Dié-des-Vosges**  
[www.fig-saintdie.com](http://www.fig-saintdie.com)
- **Le 5 décembre 2008 :**  
**Cercle Géo**  
organisé par ESGT – Le Mans  
[www.esgt.cnam.fr](http://www.esgt.cnam.fr)
- **Les 20 et 21 janvier 2009 :**  
**Technique Laser pour l'étude des environnements naturel et urbain**  
ESGT/SFPT – Le Mans  
[www.esgt.cnam.fr](http://www.esgt.cnam.fr)

## LA VIE ASSOCIATIVE

*Au cours de l'assemblée générale du 12 juin 2008 il a été rendu compte de l'action de l'association en 2007 visible au travers du Forum de la topographie, de la revue XYZ, de la vente de ses publications et par sa présence à de nombreuses manifestations professionnelles. Il a été signalé le transfert de bureau à Paris près des Champs-Élysées au 107 rue La Boétie, annoncé la rénovation prochaine du site Internet et procédé au renouvellement statutaire, par tiers, des membres du Conseil d'administration de l'AFT. Le regain d'intérêt pour cette instance est apprécié puisqu'il y a eu plus de candidats que de postes à pourvoir.*

De nouveaux membres rejoignent ceux dont le mandat n'était pas remis en cause ou réélus à savoir André Bailly, Edmond Barbacanne, Jean Bourgois, Suzanne Débarbat, Pierre Grussenmeyer, Michel Kasser, Tania Landes, Jean-Pierre Maillard, Emmanuel Natchitz, Jacques Riffault, Daniel Schelstraete, Roger Serre et Robert Vincent. XYZ tient à les présenter et les féliciter pour leur élection :

**Lakhdar Benmamar**, titulaire du brevet de qualification au moyen d'une formation dispensée par l'ENSG, cadre dans une société de travaux publics et de construction,

**Patrice Gaubert**, ingénieur ESTP, qui a vécu une carrière de responsable commercial, notamment au sein des sociétés JSInfo et Leica, jusqu'en 2007,

**Jean-Baptiste Henry**, ingénieur ENSAIS et titulaire d'un doctorat de géographie physique, actuellement en poste au Laboratoire national de métrologie et d'essais,

**Mathieu Koehl**, ingénieur ENSAIS et titulaire d'un doctorat de sciences, maître de conférences à l'INSA de Strasbourg,

**Laurent Polidori**, Ingénieur ENSG et titulaire d'un doctorat de sciences, directeur de l'ESGT et en charge de la chaire de géomatique du CNAM.

Par suite, le conseil de l'association a composé son bureau en réélisant Michel Kasser président, Roger Serre trésorier, en élisant Mathieu Koehl secrétaire général et tous autres membres représentants et adjoints. Il a confirmé dans leurs fonctions André Bailly, comme directeur des publications, et Jean-Pierre Maillard, comme rédacteur en chef de la revue XYZ. Il a chaleureusement remercié Edmond Barbacanne d'avoir assumé pendant de très nombreuses années le secrétariat général de l'AFT. Pour décrocher en douceur, il reste membre du bureau.

**FARO**  
La Mesure du Succès



Mesurez des objets volumineux dans le moindre détail avec le nouveau Laser Scanner Photon™.

Le nouveau Laser Scanner Photon™ de FARO offre une meilleure finesse du nuage de points grâce à la réduction du bruit, plus de sensibilité et un système de superposition de couleurs simple et très précis pour des objets d'une taille allant jusqu'à 140m.

Pour en savoir plus, consultez le site [www.faro-photon.com](http://www.faro-photon.com) ou appelez le n° gratuit 00 800 3276 7253



# InfoGeo68

■ Jean-Pierre MAILLARD

*68 ne fait pas seulement référence aux événements d'un certain mois de mai. Il caractérise aussi le Haut-Rhin, un département notamment riche de ses vignobles, de la protection bienveillante des Vosges et, dans la relation avec les pays limitrophes, de la synergie engendrée par sa situation frontalière. La Conférence du Rhin supérieur, structure de coopération étatique compétente pour les affaires à portée régionale créée le 22 octobre 1975, identifie les préoccupations communes, propose des coopérations et, en tant que de besoin, sollicite des financements européens pour aider à la réalisation des projets de la région métropolitaine éponyme. L'un d'eux porte sur la conception d'outils pour une observation commune du territoire et la gestion de fonds de cartes destinés aux travaux de la Conférence en s'inscrivant dans les missions du groupe de travail "Aménagement du territoire".*

Pour sa part le Conseil général du Haut-Rhin est la collectivité territoriale en charge, comme les autres départements, des routes, des collèges, d'une action sociale... et, spécialité Alsace-Moselle oblige, tout autant de la gestion de la totalité des cours d'eau. L'intercommunalité voulue par la Loi Chevènement a déjà produit ses effets et ce n'est pas moins de 31 communautés de communes qui bénéficient de l'appui et du concours du Conseil général en particulier au travers d'un établissement public administratif : l'Agence départementale d'aménagement et d'urbanisme du Haut-Rhin (ADAUHR) qui dispose de la compétence SIG.

Le président du Conseil général, Charles Buttner précise le cadre de l'outil informatique qui "lui plaît beaucoup et lui tient à cœur". Il participe à la politique départementale de l'environnement en étant au service du grand public et de l'action des élus. Il sert aussi bien les communes qui n'ont pas de moyens que la relation avec les voisins suisses et allemands, les données géographiques n'étant pas limitées par les frontières. L'intérêt pour les nouvelles technologies s'est manifesté dès les années 70 avec la mise en œuvre, dans les profondes vallées vosgiennes ne recevant pas la télévision hertzienne, d'un

réseau câblé. Cette pratique a ouvert la voie, dans les années 90 à la fibre optique et son haut-débit. Ainsi dans les vallées de la Doller et du Soultzbach chaque maison dispose de 30 MO ce qui n'est pas encore très courant. L'investissement dans le réseau rend possible la création dans les vallées d'entreprises de la technologie de l'information et de la communication et doit permettre leur prospérité.

Dans ce contexte favorable la naissance d'un SIG départemental aux larges fonctions était prévisible et attendue.

## Le projet InfoGeo68

Mis en place en 2005, un groupe de projet SIG a proposé que le Département se dote d'un SIG transversal fédérateur, partenarial et communiquant : InfoGeo68, aujourd'hui opérationnel. Les concepteurs ont souhaité un outil d'utilisation facile dans un souci de démocratisation du SIG. Ils ont demandé également la mise en œuvre d'une solution pérenne, évolutive et flexible.

Le partenariat associe principalement l'ADAUHR, les Communautés de communes, les Chambres consulaires, le Service départemental d'incendie et de secours (SDIS), le Comité d'actions économiques du Haut-Rhin (CAHR), les Eurodistricts transfrontaliers, la Conférence du Rhin supérieur, plusieurs associations et les services de l'Etat.

Les principaux objectifs du SIG départemental peuvent être résumés comme suit :

- InfoGeo68 mutualise les informations du Département et des partenaires,
- InfoGeo68 fédère l'ensemble des services du Département autour d'un SIG unique,



- Infogeo68 constitue un outil d'aide à la décision pour les élus et la direction générale des services. D'ores et déjà, le site Infogeo68 permet la consultation et la modification de l'ensemble des données géoréférencées dont disposent le Département et ses partenaires en offrant :
  - aux citoyens un accès Internet gratuit riche de données départementales,
  - aux partenaires un accès Extranet sécurisé permettant, outre la consultation, la modification de leurs propres données,
  - aux élus et agents départementaux un accès Intranet à l'ensemble des données, en consultation et modification.

## Les données

Le Département prend directement à sa charge l'ensemble des coûts du système et de son fonctionnement. Il acquiert et maintient, partiellement dans le cadre d'un partenariat de niveau régional les données de référence. L'ensemble des données acquises est mis gratuitement à la disposition de tous les partenaires. Les données de référence sont :

- celles des bases de l'IGN ( Scan25, BD ortho, BD topo, BD adresses)
  - la BD ortho d'hiver à 0,20 m sur les zones urbanisées,
  - la BD parcellaire vecteur,
  - la BD occupation du sol
  - la topographie aérienne laser (MNT et MNS effectifs sur 60 % du territoire fin 2008),
  - le parcellaire du Cadastre, en totalité fin 2008,
- auxquelles s'ajoutent trois cents séries de données dans le domaine de l'environnement, de l'action sociale, du tourisme, de l'éducation, des transports... Les données relatives à la BD ortho d'été à 0,30 m sur l'ensemble du Département et celles définissant les documents d'urbanisme (POS/PLU) sont en cours d'acquisition.

La disponibilité d'une BD ortho d'hiver et d'une seconde d'été souligne la polyvalence du SIG. Le fond de plan d'hiver satisfait les utilisateurs de la topographie et celui d'été sert ceux de la communication.

## L'organisation

Même si les données géographiques sont centralisées dans une base unique, l'organisation retenue est décentralisée. Seuls, au cœur du système, un administrateur et une coordination s'assurent de la cohérence des données et de leur non-pollution, définissent leur structuration et animent le réseau des utilisateurs. En revanche, les responsables des données dans les services producteurs restent gestionnaires de leurs propres données. Des référents par secteur ou direction apportent un appui aux utilisateurs. Les systèmes de mise à jour sont suffisamment simples ce qui facilite les tâches de saisie toujours effectuées depuis le site Infogeo68.

## L'équipement du SIG

Le Département du Haut-Rhin a choisi la solution ArcGIS Server d'ESRI dont la dernière version 9.2 constitue une évolution majeure en considérant une possibilité d'édition de données intégrée et des performances accrues par les possibilités de mémoires. Le site proprement dit a été installé par la société Arx IT de Genève.

## Architecture

L'architecture mise en place est décrite sur le schéma ci-dessous. Elle est constituée d'un dédoublement du système pour séparer l'accès Internet des accès Intranet/Extranet sécurisés par une authentification.

En interne les agents accèdent aux données stockées dans une base SQL Server accessible via ArcSDE. Les données sont répliquées sur le serveur Internet chaque semaine dans une file Geodatabase. Les droits de mise à jour sont définis pour chaque utilisateur ou groupe d'utilisateurs en fonction de leurs missions.

## Le site Infogeo68

La quasi-totalité des données est accessible sur le site [www.infogeo68.fr](http://www.infogeo68.fr) qui permet la visualisation d'une centaine de cartes prédéfinies classées par domaines (eau, environnement, solidarité, histoire) eux-mêmes subdivisés par thèmes. Par exemple, celui du tourisme distingue les loisirs touristiques et sportifs, l'hébergement, les structures d'accueil, les loisirs culturels. Par zooms successifs, le fond de plan évolue.

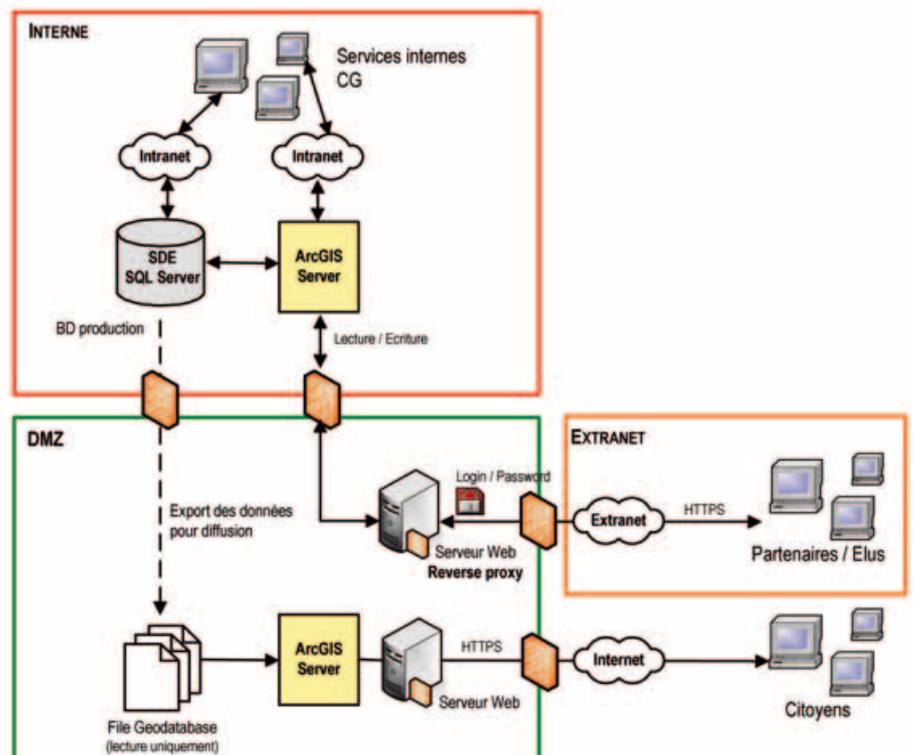


Schéma de l'architecture.

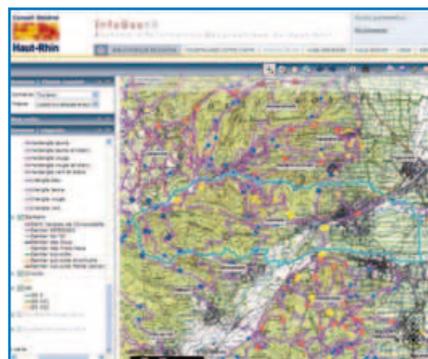


lue d'une carte à petite échelle jusqu'à l'orthophotoplan. L'internaute peut accéder directement à une commune, un canton ou une adresse donnée. Il peut également établir sa propre carte par l'utilisation des données existantes. Il dispose d'outils de recherche, de calcul de distance ou de surface. Il peut également réaliser, à partir du MNT, des profils en long ou en travers. Un logiciel de dessin géoréférencé permet de renseigner tout document avant impression ou enregistrement.

Avec tous ces moyens, l'utilisateur peut ainsi faire apparaître sur tel territoire, les écoles de musique dans lesquelles le piano est enseigné ou calculer la distance et la dénivelée de sa prochaine randonnée.

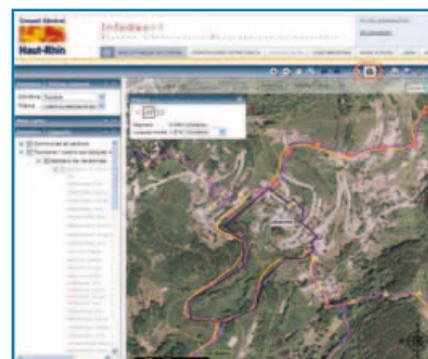
Au-delà des applications cartographiques offertes au public, Infogeo68 est d'abord un outil au service de l'in-

formation des services départementaux et de la gestion assurée par leurs soins. Il est aussi un moyen de communication potentiel. Par exemple, la direction départementale en charge de la gestion de l'eau, est en mesure, en temps réel, d'indiquer les hauteurs d'eau dans les rivières et de restituer, pour la plus grande satisfaction des sportifs amateurs de descente en kayak, l'information par Infogeo68.



Un SIG est toujours en perpétuelle évolution et nul doute que celui du Haut-Rhin, soutenu par la volonté des élus, ne manquera pas de suivre l'actualité des données et celle des progrès informatiques. On annonce déjà la prochaine mise en place d'un logiciel de survol en 3D... ●

► Pour tout renseignement :  
[www.infogeo68.fr](http://www.infogeo68.fr)  
[www.esrifrance.fr](http://www.esrifrance.fr)



## PUBLICATIONS DE L'AFT

Retourner ce bulletin accompagné du règlement à l'Association Française de Topographie  
107, rue La Boétie - 75008 Paris - Tél. : 01 43 98 84 80 – Fax : 01 42 25 41 07 - Courriel : [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org)

Titre	Auteur	QtO	PU (TTC)	TOTAL
Sciences géographiques dans l'Antiquité	Raymond d'Hollander		55,10 €	
Mesurer la Terre 300 ans de géodésie	Jean-Jacques Levallois		41,10 €	
Lexique topographique			15,20 €	
<b>Total</b>				

Frais de port inclus

M./Mme/Mlle Nom : \_\_\_\_\_ Prénom : \_\_\_\_\_

Société ou organisme : \_\_\_\_\_

Secteur d'activité : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code postal : [ ][ ][ ][ ][ ][ ] Ville : \_\_\_\_\_

Tél. : [ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ] Fax : [ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ]

Courriel : \_\_\_\_\_

Règlement par chèque joint, à l'ordre de l'Association Française de Topographie

Je désire recevoir une facture

## XXI<sup>e</sup> Congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection : Pékin 3-11 juillet 2008

■ Pierre GRUSSENMEYER - Laurent POLIDORI

*La Chine a accueilli le congrès de 2008 de l'ISPRS à Pékin en juillet, quelques semaines avant l'ouverture des Jeux Olympiques, offrant aux participants l'opportunité de visiter cet immense pays et une ville transformée par le "facteur olympique". Cet article donne un aperçu des développements actuels en photogrammétrie et en télédétection, et dresse un bref bilan des activités des 8 commissions de l'ISPRS.*

**D**es milliards de téléspectateurs ont pu assister aux Jeux Olympiques de la XXIX<sup>e</sup> olympiade organisés par la Chine à Pékin du 8 au 24 août. Quelques semaines auparavant (du 3 au 11 juillet), le congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection était organisé au Centre International des congrès de Pékin par la société chinoise de Géodésie, Photogrammétrie et Cartographie et le Bureau National de Topographie et de Cartographie. Il se tenait à quelques centaines de mètres du complexe olympique national et des



Le centre de congrès de Pékin qui accueillait l'ISPRS, à proximité du village olympique.

désormais célèbres "nid d'oiseau" (stade olympique) et "cube d'eau" (piscine olympique). Pendant le congrès, l'accès aux installations olympiques était interdit jusqu'à l'ouverture des Jeux, une multitude de Chinois se consacrant aux derniers travaux et préparatifs à Pékin avec le souci du moindre détail.

Le XX<sup>e</sup> congrès de l'ISPRS à Istanbul en 2004 avait désigné Pékin et l'équipe du professeur Jun Chen pour l'organisation du XXI<sup>e</sup> congrès en 2008, empruntant ainsi la Route de la Soie vers l'Asie (d'Istanbul à Pékin, d'où le slogan du

congrès : "Silk Road for Information from Imagery").

L'expansion rapide de la Chine et son impact sur le monde entier ont attiré de nombreux congressistes, curieux d'en savoir plus sur ce pays et intéressés par la juxtaposition des cultures anciennes et modernes d'une des plus vieilles civilisations au monde.

Lors de son discours inaugural, Le professeur Ian Dowman, Président sortant de l'ISPRS a rappelé qu'une des missions de l'ISPRS était de promouvoir la coopération internationale sur l'utilisation des données-images. Elle est

A quelques pas... du site olympique



Le nid d'oiseau (stade olympique)



Le cube d'eau (piscine olympique).



Jun Chen, directeur du congrès 2008.

essentielle pour l'avancement du savoir, la recherche, le développement et l'éducation en photogrammétrie, télédétection et sciences de l'information spatiale. Ces propos ont trouvé tout leur sens lorsque Deren Li, professeur à l'Université de Wuhan, a retracé dans une session plénière l'importance de la photogrammétrie et de la télédétection dans la gestion des catastrophes à travers le récent tremblement de terre du 12 mai 2008 à Wenchuan dans la province du Sichuan. Le bureau national de Topographie et de Cartographie chinois a en effet diffusé dès le 13 mai une première image à haute résolution de la zone proche de l'épicentre à partir des données issues de 6 satellites. Le 14 mai, la carte de la région avec la situation post-tremblement de terre (glissement de terrain, carte hydrologique, réseau routier) était diffusée sur CCTV. Le 16 mai un avion équipé de capteurs photogrammétriques numériques couvrait un territoire de 500 km<sup>2</sup> autour de l'épicentre avec plus de 600 images d'une résolution d'environ 0,5 m. Le 18 mai, des hélicoptères et des drones ont permis d'obtenir des images d'une résolution de 0,15 m.

## Participation

Les organisateurs ont diffusé le chiffre de 2 946 participants (dont 1 516 issus de 76 pays, 150 personnes accompagnantes et 1 280 chinois inscrits au congrès). L'assemblée générale de l'ISPRS, a quant à elle, réuni 41 pays et 120 participants. La délégation Française, conduite par Marie-José Lefèvre-Fonollosa (Présidente de la SFPT), était constituée d'une quarantaine de participants, un nombre identique à celui des médailles remportées par nos sportifs lors des Jeux Olympiques quelques semaines plus tard... !

Pays	Participants ISPRS 2008
Chine	1 280
Allemagne	187
USA	136
Japon	122
Turquie	79
Corée	61
Australie	54
Italie	52
Suisse	52
Canada	49
Iran	49
France	40

Aperçu du nombre de participants par pays.

## Publications du congrès

En plus des traditionnels actes du congrès, qui représentaient un total de 10 334 pages pour l'ensemble des huit commissions, l'ISPRS a édité un livre pour ce congrès. Ce "Congress Book" en anglais est destiné à présenter un aperçu des développements scientifiques et technologiques dans les domaines de l'ISPRS et comporte 34 chapitres rédigés par 62 chercheurs

actifs au sein de l'ISPRS (Li et Al., 2008). L'ouvrage comporte 6 parties :

- Introduction
- Capteurs, plates-formes et systèmes d'acquisition
- Traitement et analyse des données
- Modélisation, gestion et visualisation des données
- Applications
- Education et coopération

Un autre ouvrage bilingue rédigé en chinois ainsi qu'en anglais, intitulé "Photogrammetry and Remote sensing in China", a été remis à tous les participants.

## Bilan des travaux des commissions 2004-2008 de l'ISPRS

### ■ Commission I : Acquisition des images – Capteurs et plates-formes

Président sortant : Alain Baudoin, France

Les articles proposés par cette commission montrent l'intérêt actuel pour les techniques SAR (Radar à synthèse d'ouverture) et LiDAR (Laser). Juergen DOLD (Leica Geosystems) a présenté l'évolution des techniques LiDAR au

Commission	Thème	Nbre de résumés soumis	Nbre d'articles publiés	Pages
I	Acquisition des images Capteurs et plates-formes	376	233	1374
II	Théories et concepts de traitement de l'information et des données spatio-temporelles	353	193	1132
III	Vision par ordinateur en photogrammétrie et analyse d'images	298	178	1064
IV	Bases de données localisées et cartographie numérique	457	324	1864
V	Vision à courte distance – analyses et applications	365	186	1106
VI	Enseignement et assistance	180	49	272
VII	Traitements thématiques, modélisation, analyse des données en télédétection	389	303	1750
VIII	Applications de télédétection et politiques	397	251	1430
Total		2815	1717	9992



cours d'une session plénière en dressant le panorama des techniques Lidar de la décennie écoulée et les perspectives offertes par les nuages de points et les images 3D. Au cours de la dernière année, la précision des données a progressé d'un facteur 4 pour un temps d'acquisition divisé par 10 ! En parallèle les coûts diminuent et les systèmes sont plus portables et plus polyvalents.

Une autre présentation de Jose Achache a démontré l'intérêt d'améliorer la coordination entre les systèmes spatiaux, aéroportés et terrestres en présentant l'infrastructure GEOSS (*Global Earth Observation System of Systems*) proposée par GEO (le groupe intergouvernemental d'observation de la Terre). GEO réunit 74 pays et 51 organisations collaborant pour la construction de GEOSS.

### ■ *Commission II : Théories et concepts de traitement de l'information et des données spatio-temporelles*

**Président sortant :** Wolfgang Kainz (Autriche)

L'objectif fixé à cette commission en 2004 était de rapprocher l'ISPRS du monde des systèmes et des sciences de l'Information Géographique. Les travaux de la commission concernent la modélisation spatio-temporelle, le raisonnement spatial, l'analyse et l'exploration des données, les représentations multiples, la visualisation, l'aide à la décision, l'intégration des systèmes et l'opérabilité, la qualité des données et modèles spatiaux, et le traitement de données 3D et dynamiques.

Le développement des services proposés par Google Earth ou Microsoft VirtualWorld (sans oublier le Géoportail en France) est vertigineux. Ces services ont un impact sur la société et sur la manière d'utiliser l'information spatiale. Qui pouvait imaginer il y a une dizaine d'années une visite virtuelle du monde entier en 3D sur le Web ?

La pénétration de la technologie SIG dans un nombre croissant de domaines démontre le besoin de recherches dans les domaines de la modélisation spatiale, l'interopérabilité et la visualisation.



### ■ *Commission III : Vision par ordinateur en photogrammétrie et analyse d'images*

**Président sortant :** Wolfgang Förstner (Allemagne)

La génération des modèles 3D urbains à partir de nuages de points, l'identification de routes à partir d'images vidéo ou le perfectionnement d'algorithmes sont quelques thèmes phares de la commission III. Les photogrammètres font partie des quelques milliers de chercheurs du domaine de la vision par ordinateur en perpétuelle croissance, qui rendent possible la vision à l'aide de nos ordinateurs.

L'automatisation de la compensation par les faisceaux en vision à courte distance a beaucoup progressé, seule la saisie interactive des points d'appui reste manuelle. La génération de modèles surfaciques très détaillés construits à partir d'images a progressé à tel point que les images constituent une alternative intéressante au LiDAR. L'accès direct à l'information 3D issues des systèmes LiDAR a déclenché de nombreuses recherches, augmentant la qualité morphologique des modèles numériques d'élévation, facilitant la reconstruction 3D des zones urbaines et l'analyse détaillée des zones forestières. La densité de l'information peut encore augmenter avec l'arrivée des systèmes à retour d'onde complète capables d'enregistrer l'intégralité du signal retour pour chaque impulsion laser émise, permettant des classifications plus détaillées. L'interprétation des

images aériennes et terrestres s'inspire avec succès des techniques de reconnaissance des formes et d'apprentissage automatique, spécialement pour la modélisation des réseaux routiers et des structures de façades.

Finalement l'analyse des séquences vidéo devient un sujet à la mode, spécialement pour les traitements visant simultanément la localisation et la cartographie à partir d'images terrestres ou aériennes issues de drones.

### ■ *Commission IV : Bases de données localisées et cartographie numérique*

**Président sortant :** Shailesh Nayak, (Inde)

Au cours des deux derniers millénaires, les cartes ont toujours été un moyen efficace de représenter l'information. Le développement des technologies spatiales, géospatiales, informatiques et de communication a considérablement modifié l'acquisition, l'organisation, l'analyse et la diffusion de l'information. La mise à jour régulière et automatique des bases de données demeure un problème fondamental. Des bases de données thématiques diversifiées ont été produites à différents niveaux (mondial, national, local), destinées à la gestion des ressources, au changement climatique et la protection de l'environnement. La disponibilité récente des images stéréo à haute résolution spatiale issues des capteurs aéroportés et spatiaux a modifié l'acquisition des données et constitué une opportunité



pour le développement de techniques d'extraction automatique de données. Les bases de données à haute résolution temporelle se développent, spécialement pour les données océanographiques.

Les développements dans le domaine de la visualisation permettent de représenter les paysages virtuellement et de dépeindre à la fois les processus globaux et locaux. L'utilisation des SIG pour accéder, analyser et diffuser l'information spatiale a mis en valeur les services Web. Les logiciels libres fournissent des solutions nouvelles et rentables pour les services Web d'information géographique. Le développement permanent de normes pour l'interopérabilité constitue un potentiel énorme pour l'échange de données scientifiques.

Plusieurs missions pour l'exploration des ressources de notre système solaire sont actuellement en cours. Les données fournies par ces missions constituent un nouveau chapitre dans la cartographie des systèmes extraterrestres et dans la création de bases de données spatiales sur le Web.

### ■ *Commission V : Vision à courte distance – analyses et applications*

**Président sortant :** Hans-Gerd Maas (Allemagne)

Les activités de la commission V intègrent les techniques d'imagerie et de balayage laser dans des domaines très variés comme la métrologie industrielle, la documentation du patrimoine culturel, l'acquisition des données 3D pour la réalité virtuelle, la robotique, l'étude des mouvements d'objets, l'imagerie médicale quantitative, la biométrie et bien d'autres.

Les techniques de mesures rapides, automatiques, économiques, fiables et précises sont recherchées pour ces différents domaines. Les problèmes dans la plupart des développements se situent au niveau de l'intégration des différentes technologies de capteurs et de la fiabilité des traitements de données, l'objectif étant d'aboutir à des systèmes photogrammétriques de mesure précis, hautement automatisés ou fonctionnant en temps réel.

En plus des multiples types de caméras numériques (haute résolution, rapide, à perspective centrale, panoramique, hémisphérique, télécentrique, etc.), les scanners laser terrestres et les nouvelles caméras 3D sont de plus en plus utilisés. L'évolution de ces dispositifs stimule également l'intérêt pour les techniques de traitement d'images et de nuages de points 3D.

### ■ *Commission VI : Enseignement et assistance*

**Président sortant :** Kohei Cho (Japon)

La commission VI s'occupe principalement des questions d'enseignement en rapport avec la photogrammétrie, la télédétection et les sciences de l'information spatiale. Les avancées technologiques dans ces trois domaines sont multiples. La photographie d'amateur, les services d'information basés sur le Web comme Google Earth ou les systèmes de navigation en voiture sont couramment utilisés aujourd'hui.

L'intérêt croissant pour ces applications est lié à l'augmentation des besoins techniques et de formation. Les avancées technologiques rapides ont renforcé l'intérêt pour la formation continue, notamment grâce au Web et la formation à distance. Malgré l'augmentation des supports éducatifs et des cours en ligne, il n'est pas facile pour les débutants ou les étudiants de trouver les supports appropriés. La reconnaissance et la promotion des supports en ligne par l'ISPRS permettent de les faire connaître au public.

La commission a présenté un projet pour l'analyse de logiciels d'enseignement à distance et des conseils pour le développement d'un processus d'assurance qualité pour renforcer la confiance dans les programmes d'enseignement à distance des universités, ainsi que leur acceptation.

La 5<sup>e</sup> édition du CATCON (Computer Aided Teaching CONtest) a permis de promouvoir le développement de logiciels éducatifs gratuits dans les domaines d'activité de l'ISPRS. La promotion de la profession envers les étudiants s'est concrétisée par l'organisation de trois écoles d'été entre 2004 et 2008.

### ■ *Commission VII : Traitements thématiques, modélisation, analyse des données en télédétection*

**Président sortant :** John Van Genderen (Pays-Bas)

Le développement rapide de données en télédétection radar (SAR), telles que RADARSAT-2, COSMO-SkyMed et TerraSAR permet de disposer d'images détaillées de la terre quelles que soient les conditions météorologiques. Le lancement de ces satellites a généré des recherches sur les méthodologies de fusion des images et des données. Le récent tremblement de terre à Sichuan a permis de démontrer comment les données SAR, combinées à d'autres sources de données, ont pu être utilisées pour assister les équipes sur le terrain dans des conditions météorologiques difficiles.

Un autre sujet important traité au sein de la commission VII concerne les fondements physiques pour une meilleure compréhension des paramètres géophysiques qui influencent les signaux enregistrés par les capteurs.

De nouveaux algorithmes de traitement d'images et techniques d'analyse ont permis de montrer les progrès rapides dans les méthodes de classification d'images, dans le prolongement des techniques conventionnelles de classification pixellaire et des procédures avancées de classification contextuelle ou basées sur les textures.

Enfin la détection des changements est plus que jamais un sujet d'actualité.

### ■ *Commission VIII : Applications de télédétection et politiques*

**Président sortant :** Ammatzia Peled (Israël)

Cette commission plus orientée vers la télédétection que la photogrammétrie réunit des études, des applications et des analyses, souvent par la mise en œuvre de processus de classification. La détection de différents phénomènes s'appuie sur la reconnaissance de caractéristiques spectrales, spatiales et logiques de différents objets ou groupes d'objets. L'identification de chaque caractéristique d'après une





Les présidents des commissions I à VIII de l'ISPRS (2008-2012) - De droite à gauche :  
 Commission I - Canada - Naser El-sheimy  
 Commission II - Hong Kong, Chine - John Shi Wenzhong  
 Commission III - France - Nicolas Paparoditis  
 Commission IV - USA - Marguerite Madden  
 Commission V - Grande-Bretagne - Jonathan Philips Mills  
 Commission VI - Pays-Bas - Martien Molenaar  
 Commission VII - Autriche - Wolfgang wagner  
 Commission VIII - Japon - Haruhisa Shimoda

logique méthodologique, hiérarchique, ou floue dans le domaine temporel ou fréquentiel, dans un espace dimensionnel ou paramétrique laisse entrevoir de nombreuses pistes de recherche. Les domaines d'application des articles présentés au sein de la commission VIII sont variés et sensibles : analyse d'impact, risques et catastrophes, santé publique, pollution de l'air, gestion des zones côtières, recherche alpine et cryogénique, pollution des sols, dégradations des territoires, désertification et zones arides, gestion des zones tropicales, surveillance des ressources en eau, agriculture, forêt durable, gestion des paysages, cartographie géologique, géomorphologie ou encore des sujets en rapport avec la politique, les traités et l'accès aux données en télédétection.

Secrétaire Général : Jun Chen (Chine)  
 Premier vice-président : Ian J. Dowman (Grande-Bretagne)  
 Second vice-président : Ammatzia Peled (Israël)  
 Trésorier : Mike Renslow (USA)  
 Directeur du Congrès ISPRS 2012 : Cliff Ogleby (Australie)

### ■ Commissions Techniques

Lors de la 2<sup>e</sup> Assemblée Générale, les délégués des différents pays ont élu les huit présidents de commissions pour la période 2008-2012. Nicolas Paparoditis (directeur de recherche au Matis à l'IGN) présidera la commission III (vision par ordinateur en photogrammétrie et traitement d'images) et organisera donc le congrès de cette commission en France en 2010.

Cette exposition constituait également une chance pour la communauté chinoise de découvrir les dernières innovations et tendances technologiques actuelles.

Le marché des caméras numériques est toujours très actif. Franz Leberl, fondateur de Vexcel Imaging (une société appartenant aujourd'hui à Microsoft), avait donné le ton au cours d'un exposé remarqué sur sa vision de l'imagerie numérique au cours d'une séance plénière.

La plupart des constructeurs proposent de nouvelles versions de leurs capteurs à grand format. Les caractéristiques du capteur de la nouvelle caméra UltraCamXp (prime) sont de 17310 par 17310 pixels (196 Mpixel) au lieu des 130 Mpixel de l'UltraCam-X. Vexcel annonce aussi une capacité de stockage plus importante et des performances

## Organisation de l'ISPRS pour la période 2008-2012

### ■ Membres du Conseil

Président : Orhan Altan (Turquie)



Prof. Orhan Altan, nouveau président de l'ISPRS.

Orhan Altan travaille depuis 1979 à l'Université Technique d'Istanbul où il occupe les fonctions de professeur depuis 1989 à la tête du département de Photogrammétrie. Il a organisé en 2003 le congrès du CIPA (Comité International de Photogrammétrie Architecturale) à Antalya (Turquie) et en 2004 le XX<sup>e</sup> Congrès de l'ISPRS à Istanbul. Il a occupé les fonctions de secrétaire général de l'ISPRS de 2004 à 2008.

## Exposition

Le congrès de l'ISPRS accueille traditionnellement une exposition. A Pékin, 95 exposants (dont 34 sociétés chinoises) issus de 26 différents pays étaient présents. Plus de 10000 visiteurs ont pu découvrir les stands répartis sur trois niveaux, offrant l'opportunité aux scientifiques, aux constructeurs et aux prestataires d'échanger des idées et de développer des contacts.





radiométriques accrues pour ce nouveau modèle.

Leica Geosystems a remplacé son système ADS40 par la version ADS80, améliorant aussi les performances radiométriques et le processus de traitement pour augmenter la productivité. C'est sur le marché des capteurs à moyen format que l'on enregistre le plus de nouveautés. Les spécialistes estiment que ce marché représentera à peu près le double de celui des capteurs à grand format. D'après les informations diffusées lors du congrès, environ 300 caméras numériques à grand format ont été vendues depuis 2001 et il ne reste plus en service que 600 chambres de prises de vues aériennes à film sur les 2 500 répertoriées au début de ce siècle.

Mostafa Madani (ZI Imaging) prévoit que le marché du numérique sera deux fois plus important que celui des chambres argentiques. D'après Madani, le facteur important en photographie moderne est la capacité à produire de la donnée 3D. Comme les surfaces photographiées sont de plus en plus importantes et que les délais pour traiter les données sont de plus en plus courts, la solution se trouve dans la fiabilité des processus automatiques de transformation des images.

Intergraph pour sa part a présenté la nouvelle caméra RMK D, modèle réduit (1/2) de la caméra grand format DMC. Klaus Neumann (Intergraph Allemagne) estime que le prix de cette



Cliff OGLEBY sera le Directeur du congrès à Melbourne en 2012.

caméra pourrait lui aussi être réduit de moitié.

Vexcel a annoncé qu'une version compétitive de la caméra Ultracam, appelée UltraCam L pourrait être proposée d'ici la fin de l'année.

La société Wehrli Geosystems a présenté sa nouvelle caméra 4-DAS-1 et prévoit de produire une caméra 3-DAS-2 à large format en 2009.

Applanix a exposé sa solution numérique DS 439 RapidOrtho qui intègre un LiDAR et deux caméras en option.

Enfin, la société Belge Dimac a proposé une gamme de trois caméras avec différents formats (large et moyen).

## Prochain congrès en 2012 à Melbourne (Australie)

Pour le congrès de 2012, seule la candidature de Melbourne était finalement proposée aux délégations lors de l'assemblée générale, sans autre projet concurrent. Les mêmes Australiens étaient déjà candidats lors du congrès d'Istanbul en 2004 mais à l'époque le projet des Chinois avait été retenu. Cliff Ogleby, professeur à l'Université de Melbourne a mené son projet avec enthousiasme. Il dirigera le congrès de 2012 dans sa ville natale dans un nouveau Palais des Congrès. Cet archéologue passionné qui enseigne la géomatique est aussi président du CIPA (Comité International de Photogrammétrie Architecturale).

Le site [www.mcvb.com.au/isprs2012](http://www.mcvb.com.au/isprs2012) permettra au lecteur de trouver toutes les informations sur la candidature australienne.

La candidature de Paris pour l'organisation du Congrès de l'ISPRS en 2016 a été évoquée officieusement. Cette candidature devra être présentée en 2012 par la SFPT à Melbourne. ●

## Bibliographie

CHEN J., JIANG J. (eds), 2008. *International archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, part B, volume XXXVII, 10 volumes, 10334 pages, ISSN 1682-1750 (DVD).

GRUSSENMEYER, P. (2004). *XX<sup>e</sup> Congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection : bilan et projets*. Revue de l'Association Française de Topographie, 3<sup>e</sup> trim. 2004 N°100, ISSN 0290-9057, p. 27-34.

ISPRS Daily (n° 1 à 8), journaux publiés quotidiennement au XXI<sup>e</sup> congrès de l'ISPRS à Beijing (téléchargeables à l'adresse [www.isprs2008-beijing.org](http://www.isprs2008-beijing.org))

ISPRS silver book 2004-2008, published by ISPRS headquarters, 96 p.

LI, Z., CHEN, J., & BALTSAVIAS, E., (eds), 2008. *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book*, ISPRS Book Series, Volume 7, © 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47805-2, 527p.

## Liens Internet

[www.isprs.org](http://www.isprs.org)

[www.isprs2008-beijing.org](http://www.isprs2008-beijing.org)

[www.geobeijing.info](http://www.geobeijing.info)

[www.sfpt.fr](http://www.sfpt.fr) (Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection)

## Contacts

**Prof. Pierre GRUSSENMEYER**

Vice-président de l'AFT  
INSA de Strasbourg, Département Génie Civil et Topographie  
[Pierre.Grussenmeyer@insa-strasbourg.fr](mailto:Pierre.Grussenmeyer@insa-strasbourg.fr)

**Prof. Laurent POLIDORI**

Vice-Président de la SFPT  
Directeur de l'ESGT  
[laurent.polidori@esgt.cnam.fr](mailto:laurent.polidori@esgt.cnam.fr)

## ABSTRACT

*In July, China hosted the 2008 ISPRS Congress in Beijing, a few weeks before the opening of the Olympic Games. The participants had the opportunity to visit this great country and a city transformed by the "Olympic factor". This paper gives an overview of the current developments in Photogrammetry and Remote Sensing, and shortly reports about the activities of the 8 ISPRS commissions.*



# Festival international de Saint-Dié-des-Vosges



19<sup>e</sup> édition du jeudi 2 au dimanche 5 octobre 2008

■ **Jean-Pierre MAILLARD**

*Chaque début d'automne, le Festival international de géographie (FIG) se déroule sur quatre jours à Saint-Dié-des-Vosges. Le FIG 2008 intéresse au moins quarante-cinq mille festivaliers, mobilise trois cents intervenants et propose deux cents moments culturels (spectacles, expositions, tables rondes, conférences, cinéma, cafés géo, et pour la première fois cafés carto...) sous l'œil et l'oreille des médias qui profitent de la qualité et de l'actualité des sujets abordés. L'Éducation nationale reconnaît aussi l'intérêt du FIG puisqu'il accueille depuis huit ans, cette année encore, plus de cent cinquante inspecteurs et enseignants en mission de formation. Cette dernière s'inscrit dans les itinéraires pédagogiques préparés par les inspecteurs généraux Bruno Mellina et Michel Hagnerelle. On ne répétera jamais assez que toutes les manifestations sont publiques et gratuites ce qui ajoute à l'originalité du FIG. Le concept s'exporte lentement mais sûrement en premier aux États-Unis et au Portugal.*

## Le FIG 2008 et le Salon du livre

En partenariat avec l'Académie des sciences, la 19<sup>e</sup> édition aura lieu du jeudi 2 au dimanche 5 octobre 2008 sur le thème scientifique "Entre guerres et conflits, la planète sous tension" qui participe à l'Année de la planète portée par l'UNESCO. Le pays invité est le Japon, une heureuse façon de marquer le 150<sup>e</sup> anniversaire des relations diplomatiques franco-japonaises. La 19<sup>e</sup> édition consacre la place de la géographie dans les sciences humaines puisque, depuis peu, les professeurs ne sont plus "d'histoire et de géographie", mais d'"histoire" ou de "géographie".

Dans sa présentation Christian Pierret, Maire de Saint-Dié-des-Vosges et président-fondateur du FIG rappelle que les FIG traitent des sujets de société dans des confrontations pacifiques. En accueillant le partage des points de vue il souligne : "La guerre, pour les générations qui nous ont précédé, était du sang et des larmes. Elle pourrait très bien ne plus être que des larmes celle de la soli-

*tude du quotidien. Car la guerre a changé de nature, elle ne théâtralise plus la violence en légende. Celle de la grandeur. Le champ de bataille est mondial, tous n'y portent pas d'uniformes mais les armées sont de métier, enrôlées par contrat à durée déterminée au gré des variations du prix des matières premières, du pétrole, de la main-d'œuvre. Les armes sont financières, mobiles, anonymes comme les sociétés, fulgurantes, pour des combats instantanés et souvent virtuels. La nature des conflits pourtant n'a pas changé : s'assurer les ressources pour se donner les moyens d'agir à l'extérieur et être présent partout. La récompense : la croissance qui permet de constituer les profits et, parfois, de redistribuer les richesses. Pour éviter les affrontements, les nations devaient donc déléguer leur puissance à des entrepreneurs et les États renoncer à leur pouvoir. Tel était le système de paix d'un libéralisme d'échange qui avait fini par triompher de la guerre froide, dernière survivance d'une géopolitique impériale ou coloniale... Seulement, la séparation claire du politique et de l'éco-*

*nomique n'est pas si réelle... Plus que la guerre, c'est le combat qui a changé de nature en devenant un combat de tous les jours pour garder les capacités de résistance et qui réclame encore plus de cohésion collective, de ténacité, de solidarité, de fraternité."*

Si, à travers l'histoire, d'aucuns ont mis la géographie au service de la guerre, le service géographique des armées n'est pas si loin, le FIG renverse la formule et veut croire que la géographie sert aussi à préparer la paix.

La présidence du FIG 2008 est confiée à Hélène Carrère d'Encausse, secrétaire perpétuel de l'Académie française et celle du Salon du livre "Amerigo Vespucci" à Michel Serres, philosophe de la connaissance, le grand témoin du festival étant cette année Jérôme Clément, président d'Arte France. La participation de ces trois personnalités du monde de la culture honore le festival et valorise son rayonnement international tout comme la présence, entre autres, de Horacio Capel Saez, Sylvain Augier, Richard Bohringer, Jacques Lévy, Antoine Sfer.

Successeur de Laurent Carroué dans le rôle de directeur scientifique, Alexandre Moine montre à son tour combien la communauté des géographes est réactive aux grandes questions de société. Pour répondre aux multiples questions relatives à l'origine des conflits et des guerres – il n'existe actuellement pas moins de trente-cinq conflits dans le monde – des géographes, des politologues, des sociologues, des historiens, des économistes de même que des acteurs économiques, des politiques et des militaires auront la parole. Cinq itinéraires scientifiques tracent le fil des parcours entre tables rondes et conférences débats, entre présentations d'ouvrages



et cafés géographiques, etc. à savoir :

- les sources de conflits (tout fait conflit, mondialisation et ressources)
- modèles et valeurs contre les conflits (comment construire la paix dans le monde)
- nouveaux partages (les poudrières du monde)
- des frontières aux réseaux (les nouveaux territoires de la guerre)
- acteurs, tactiques, armées, médias (les guerres comme elles se font).

Le programme fait aussi une large place au Japon et à son peuple de la mer parfaitement représentés par son ambassadeur en France, M. Yutaka Imura qui donnera une conférence.

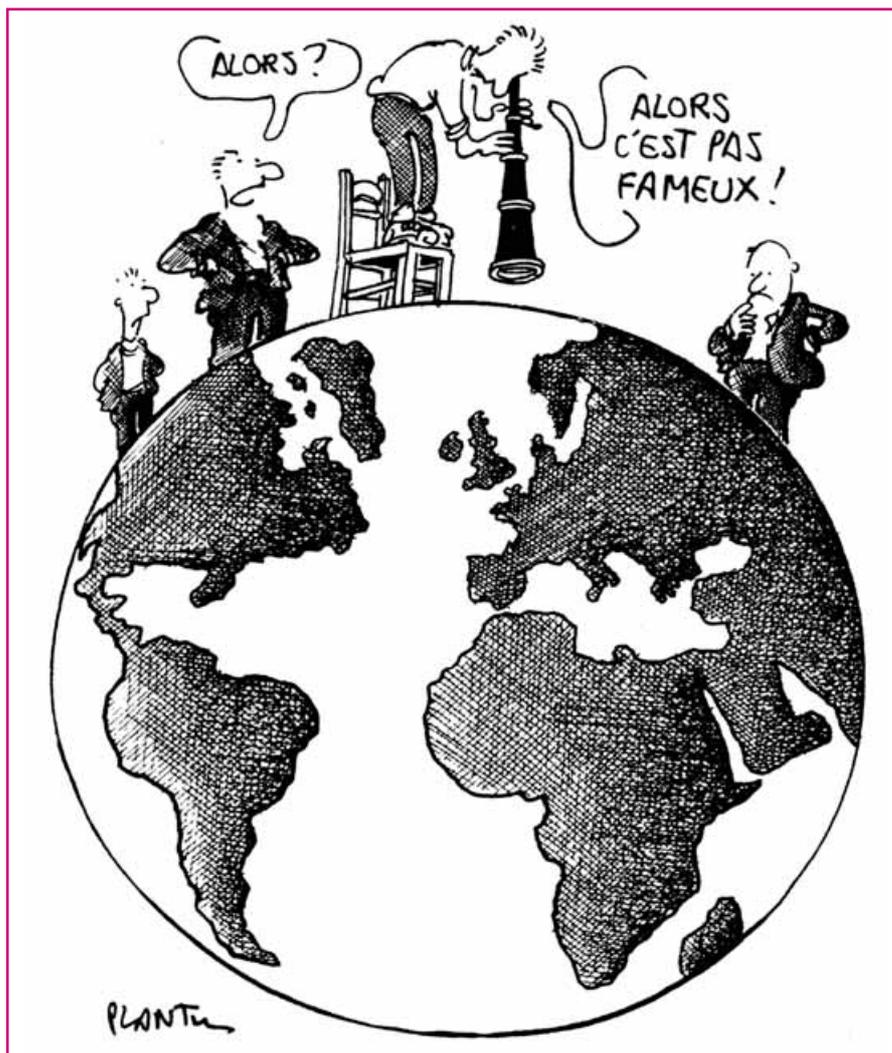
## Le prix Vautrin Lud et les autres prix géographiques

Doté de 3 000 € sponsorisé par la Lyonnaise des eaux-Suez, le jury international a décerné le "Nobel de géographie" 2008 à Horacio Capel Saez, un des plus grands géographes espagnols contemporains dont les œuvres sont largement diffusées dans le monde latino-américain. Né à Malaga en 1941, Horacio Capel Saez est professeur à l'Université de Barcelone. Depuis plus de dix ans il est l'animateur du portail et des colloques internationaux "Geocritica" et a été remarqué très tôt pour ses prises de position citoyenne. Il recevra son prix à l'ouverture du festival des mains de Monsieur Benoît Antheaume, directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD).

Le prix des thèses attribué par le Comité national français de géographie, récompensera trois des deux cents auteurs des sujets soutenus dans l'année dans les universités françaises. Deux autres prix géographiques seront distribués : le prix des posters de la recherche et le prix de géovisualisation de cartographies dynamiques, ce dernier constituant une novation.

## Le Salon de la géomatique

Pour la première fois, l'AFT sera présente au Salon de la géomatique. Elle partage un stand avec l'AFIGÉO où les adhérents et les lecteurs d'XYZ sont les bienvenus.



## "Entre guerres et conflits la planète sous tension"

### Pour une agence des géographes

La géographie qui réunit de nombreuses compétences, est un des outils pertinents pour décrypter un monde qui se modernise sans cesse. Cependant, les médias font peu recours à l'expertise des géographes alors qu'ils sont en situation pour souvent fournir une autre lecture des réalités. Dans l'esprit du regretté Noël Copin qui pensait "...c'est entre journalistes et géographes qu'il y a le plus de liens naturels", et en marge du FIG, on remarque l'initiative visant à la création d'une Agence des géographes.

### Le Salon de la gastronomie

Le FIG se serait pas le FIG si le parcours géographique du goût ne conduisait

pas au Salon de la gastronomie et au savoir des nombreux chefs participants qui font leur, l'affirmation de Jean-Robert Pitte : "La géographie a toujours fait bon ménage avec la bonne chair et le bon vin. Tout voyage est une aventure alimentaire, paysages, cultures et nourriture varient à l'infini sur la planète". Il faudra "Goûter le Japon" dont l'art culinaire participe, comme en France, à la culture nationale.

Enfin les festivaliers pourront faire connaissance avec la nouvelle revue trimestrielle "GéoGraphie" publiée par la société éponyme qui diffuse son troisième numéro également dans les kiosques. ●

Rendez-vous à Saint-Dié-des-Vosges

► Pour tout renseignement : [www.fig-saintdie.com](http://www.fig-saintdie.com)

## Les Rencontres de "Décider Ensemble"

■ Jean-Pierre MAILLARD

*Créée il y a quatre ans à l'initiative de Bertrand Plancher, député de la Meuse, l'association Loi 1901 "Décider Ensemble" s'emploie à développer une culture de concertation avec la volonté de transformer les conflits potentiels en succès collectifs. Les questions d'environnement ont en effet posé celle de la gouvernance des projets publics et privés qu'il n'est plus aujourd'hui souhaitable de faire passer en force ou en catimini, c'est-à-dire en se situant dans une logique d'affrontement exacerbée. Par son action, Bertrand Plancher souhaite, au contraire, contribuer à rendre les débats plus sereins en donnant à la concertation ses lettres de noblesse. Il fait valoir que le maître d'ouvrage doit avoir l'exigence d'exprimer son savoir-être avant son savoir-faire, de se présenter "moins droit dans ses bottes" et plus ouvert au dialogue.*

Dans cet esprit, "Décider Ensemble" participe à la veille bibliographique sur le sujet, porte à la connaissance des acteurs du débat public des retours d'expérience, et organise des formations dans le souci de servir le dialogue entre le public et le privé, le maître d'ouvrage et le citoyen. Les responsables de l'association s'appuient sur un conseil scientifique composé d'universitaires notamment de membres du CNRS, et de représentants de l'Administration. La base de données bibliographiques permet de mieux comprendre les problématiques liées à la concertation et informe sur les outils existants. La base des retours d'expériences montre la diversité des situations en soulignant les réussites locales et les méthodologies utilisées sur le terrain. Enfin, l'association organise deux ou trois forums par an qui analysent notamment l'impact de la gouvernance sur les processus décisionnels. A partir de cas concrets, les séminaires abordent des thématiques transversales liées à la concertation, la place de l'expertise, le rapport entre concertation et décision... Ces rencontres, gratuites, sont ouvertes au public concerné, le plus large possible, élus, fonctionnaires territoriaux, maîtres d'ouvrage, professionnels, commissaires enquêteurs, représentants associatifs, universitaires...

C'est dans ce cadre que "Décider Ensemble" a organisé à l'Assemblée nationale, le 3 juillet 2008, une rencontre "Un exemple de concertation : le

débat public pour la refonte de l'usine d'épuration Seine-Aval".

### La CNDP

Le principe de participation du public est posé par l'article 2 de la loi du 2 février 1995, dite loi "Barnier", relative à la protection de l'environnement et mis en œuvre par son décret d'application du 10 mai 1996. Ainsi "un débat public peut être organisé sur les objectifs et les caractéristiques principales des projets pendant la phase de leur élaboration". A cette fin, pour organiser les consultations et garantir la qualité du suivi, une instance est mise en place : la Commission nationale du débat public (CNDP).

La définition du "Débat public" conduit à dissocier celui employé dans le langage courant, dans le sens d'un débat avec le public, du "Débat public" qui constitue une véritable procédure de concertation formalisée par la législation.

Le 25 novembre 1999 le Conseil d'Etat adopte le "rapport Questiaux" qui redéfinit la place de l'utilité publique et l'appréciation de l'intérêt général, incite à associer les collectivités territoriales, préconise information et concertation avec le public non seulement en amont mais tout au long du processus de décision. Ainsi, dans le respect de la Convention d'Aarhus de 1998, la loi du 27 février 2002 relative à la démocratie de proximité instaure durablement la "participation du public à l'élaboration des pro-

jets d'aménagement ou d'équipement ayant une incidence importante sur l'environnement ou l'aménagement du territoire". Les propositions du Conseil d'Etat, largement prises en compte dans la loi, ont pour effet d'ériger la CNDP en autorité administrative indépendante, garante du bon déroulement du débat public tout en diversifiant et renforçant ses attributions.

Administrée par un conseil de vingt-et-un membres nommés pour cinq ans, la CNDP est obligatoirement saisie pour les réalisations dont le budget est supérieur à 300 M€ quel que soit le statut du maître d'ouvrage : Etat, collectivité, établissement public ou entreprise privée. Elle décide ou non de l'organisation du débat public en fonction notamment de l'intérêt national, des enjeux socio-économiques du projet et de son impact sur l'environnement ou l'aménagement du territoire. Après acceptation d'un dossier, la CNDP nomme une Commission particulière du débat public (CPDP), président et membres. La CNDP et les commissions particulières ne se prononcent pas sur le fond des projets qui leur sont soumis. Cette disposition permet de garantir la neutralité de la CNDP et des CPDP. Ceci constitue une différence majeure avec l'enquête publique puisque le commissaire enquêteur donne son avis et s'expose donc à la critique de la partialité même s'il se sent parfaitement indépendant du maître d'ouvrage ou a contrario, des opposants au projet.

### La CPDP

La CPDP ne prend en charge que de l'organisation et de l'animation du débat public. Ce débat porte sur l'opportunité, les objectifs et les grandes caractéristiques du projet. L'alternative "on fait" ou "on ne fait pas" peut être posée. Le débat se déroule en amont de la décision d'engager l'opération et donc bien avant l'enquête publique. Son rôle vise à s'assurer de la plus large information sur le projet, à obtenir les



réponses aux questions posées et à favoriser l'expression des observations, des critiques et des suggestions, en résumé permettre un dialogue entre le public et le maître d'ouvrage afin de l'éclairer sur les suites à donner au projet.

La CPDP applique le principe de transparence en n'écartant aucune expression, le principe de l'équivalence en assurant l'exposé de tous les points de vue, de toutes les positions qui sont explicitées ou débattues et surtout celui de l'argumentation. Ce dernier implique que les arguments comptent plus que la représentativité réelle ou supposée des acteurs impliqués. Par exemple élus et associatifs ont la même possibilité de s'exprimer et leurs arguments recevront la même écoute dès lors que remarques et points de vue sont argumentés.

Dans les deux mois de la clôture, la CPDP publie un compte rendu de l'ensemble des arguments échangés durant le débat et donne une description des moyens utilisés pour faciliter la participation du public. Ce compte-rendu indique les thèmes abordés ainsi qu'une synthèse des arguments.

## Le terme du débat

In fine, le Président de la CNDP dresse un bilan qui valide habituellement le compte-rendu, et acte les innovations procédurales utiles aux débats publics à venir. On constate d'ores et déjà que le développement d'Internet favorise la consultation sachant toutefois qu'il révèle une fracture sociale, une partie des citoyens étant exclue de la démocratie numérique.

En revanche, les médias et surtout la télévision ne se prêtent pas vraiment au débat puisque le sujet génère un échange d'arguments peu "vendeur" en termes d'images.

Dans les trois mois de la publication du compte-rendu, le maître d'ouvrage fait connaître, en la motivant, sa décision sur la poursuite ou non du projet et, le cas échéant, les principales modifications prises en compte.

Pour les projets portés par les élus, le débat public est une aventure. Ils reconnaissent que la concertation est néces-

saire. Cependant, une fois terminée, ils entendent bien assumer la décision comme les autres maîtres d'ouvrage.

## Le dossier de l'usine d'épuration Seine-Aval

La refonte de la station d'épuration de la ville de Paris à Achères (Yvelines) constitue un exemple de concertation. Au-delà du "public", la consultation initiée par le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP), maître d'ouvrage, a intéressé des "publics" aux premiers rangs desquels :

- les riverains et les salariés de l'usine,
- les usagers et les acteurs de l'assainissement francilien,
- les acteurs de l'épandage agricole des boues d'épuration (agriculteurs, riverains des terrains, associations...),
- les personnes concernées pour des raisons professionnelles ou personnelles par la qualité de la Seine, de son estuaire et de la mer du Nord.

Les moyens d'information et de communication ont été les plus larges possible :

- le journal du débat a été boîté aux 90 000 foyers des communes de Saint-Germain-en-Laye, Conflans-Sainte-Honorine, Achères, La Frette-sur-Seine, Maisons-Laffitte, Herblay, Sartrouville, Cormeilles-en-Parisis, Montigny-lès-Cormeilles et envoyé à 7 500 acteurs répertoriés, avec la synthèse du dossier du maître d'ouvrage,
- le dépliant de présentation du débat imprimé à 80 000 exemplaires a été distribué sur les marchés et dans les gares des 9 communes riveraines,
- un site Internet [www.debatpublic-seineaval.org](http://www.debatpublic-seineaval.org) qui a fait l'objet de 14 000 connexions et suscité 190 questions,
- des cartes T intégrées aux documents du débat qui ont été retournées par plus de 800 personnes,
- un numéro azur : 08 11 14 14 14,
- un accueil dans les locaux de la CPDP à Conflans-Sainte-Honorine,
- des expositions itinérantes dans les communes avant les réunions publiques,
- le blog : [blog.debatpublic-seineaval.org](http://blog.debatpublic-seineaval.org) a été connecté plus de 3 800 fois,
- les contributions écrites et les cahiers

d'acteurs sont respectivement aux nombres de 41 et 8 propositions,

- une réunion générale de lancement,
- cinq auditions publiques pour connaître les attentes des publics à Conflans-Sainte-Honorine, Cergy, Herblay, Nanterre et même jusqu'à Rouen en aval,
- cinq réunions thématiques pour explorer les possibles : (Comment améliorer la qualité de la Seine ?, Comment traiter les boues de la station Seine aval ?, Comment réduire les nuisances olfactives, sonores et visuelles de la station d'épuration ? Quels sont les risques industriels et sanitaires du site d'Achères ? Problématique des eaux pluviales),
- trois réunions publiques de synthèse pour évaluer les projets,
- une réunion de clôture pour débattre des principaux enseignements à Saint-Germain-en-Laye.

## En guise de conclusion

La recherche de nouvelles pratiques doit permettre de dépasser les contradictions et rechercher la "décision apaisée", de passer d'une culture de confrontation à une culture de confiance. Comme en toutes choses il convient de garder le sens de la mesure en sachant que le toujours plus n'est pas forcément le toujours mieux. Comme on l'a vu ci-dessus, il n'y a pas un seul public, mais des publics. De même il n'y a pas un seul intérêt général mais plusieurs intérêts généraux, qu'ils soient planétaire, national, local... On sent bien avec l'intégration prévisible des associations au Conseil économique et social – sans préjuger de leur représentativité – que la participation du public au débat éponyme va évoluer tout comme l'élargissement des sujets en s'ouvrant à des thématiques transversales telles la bioéthique, les mano ou encore la liberté informatique. Puisse cette évolution s'inscrire dans un cercle vertueux. ●

Remerciements à A. Sautiere de décider ensemble pour ses informations et son concours.

► Pour tout renseignement : [www.debatpublic.fr](http://www.debatpublic.fr)  
[www.deciderensemble.com](http://www.deciderensemble.com)

# Le devenir du métier de photogrammètre

■ Notes de Laurent POLIDORI transposées par Jean-Pierre MAILLARD

*En marge du Géo-événement 2008, la Société française de photogrammétrie et de télédétection (SFPT) a organisé en collaboration avec le Syndicat national des entreprises privées de la photogrammétrie et de l'imagerie métrique (SNEPPIM) une journée de travail sur le thème du "devenir du métier de photogrammètre". Elle a réuni de nombreux professionnels parmi lesquels Michel Kasser et Laurent Polidori respectivement directeurs de l'ENSG et de l'ESGT et mérite une "restitution".*

## L'état des lieux

Le cadre a été tracé par l'évocation de la longue histoire de la photogrammétrie et des bouleversements technologiques des quatre dernières décennies. Sur la base des principes fondateurs établis bien avant l'invention de la photographie, la photogrammétrie moderne est née en 1848, date du premier levé photogrammétrique (ou métrophotographique pour employer la terminologie de l'époque) réalisé par Laussedat en 1848, avec dépôt d'un brevet. Elle devient opérationnelle au XX<sup>e</sup> siècle avec l'industrialisation des restituteurs d'abord analogiques, puis analytiques, avant de devenir numériques. Le restituteur analytique a constitué un progrès limité, l'image servant uniquement à la prise de points qu'elle permet de saisir. La différence entre les deux premières générations procède de l'introduction de l'informatique et ses contraintes. La photogrammétrie numérique, bénéficiant d'une informatique mieux maîtrisée grâce à l'expérience de l'analytique, a constitué un tournant radical : elle utilise pleinement l'image et permet l'automatisation de certaines tâches. A la faveur d'une technologie conviviale et bon

marché, la photogrammétrie sort de l'atelier du photogrammètre tout comme la frappe est abandonnée par la dactylo dès que les logiciels de traitement de texte permettent à l'utilisateur d'effectuer lui-même sa saisie.

## L'évolution des métiers de la photogrammétrie

Pour les producteurs de données, le principal changement est survenu dans les années 1960-70, lorsque la photogrammétrie a permis au géomètre d'éditer ses plans. De l'analogique à l'analytique puis au numérique, l'évolution des matériels a simplifié le travail des photogrammètres mais a bouleversé leur métier le rendant même accessible à des opérateurs un peu moins expérimentés.

A titre d'illustration, le représentant d'une entreprise a témoigné d'une évolution vers la polyvalence de ses pilotes fussent-ils bons manœuvriers, et de ses photographes pour lesquels la manipulation de scanners et caméras numériques exige à présent des compétences en informatique. Ainsi la formation d'un photographe navigant, autrefois très lourde, a été en partie remplacée par l'acquisition de connaissances informatiques dès lors que les opérations sont grandement assistées par des outils d'aide à la production.

Les satellites d'observation de la Terre, de plus en plus nombreux à offrir des résolutions métriques, ne sont pas actuellement perçus par les professionnels comme des concurrents de l'aérien, et finalement plutôt complémentaires. L'avion est plus facile à programmer, il permet de couvrir un département en trois jours ce qui est impossible au moyen du satellite dans des gammes de résolution comparables. En revanche, l'accès à l'espace aérien est contraint par des considérations sécuritaires,

notamment au-dessus de sites industriels sensibles et urbains.

En ce qui concerne l'archivage des données, les professionnels n'ont pas vocation à constituer des bases de données et ne sont pas équipés pour cela puisque les clichés sont généralement livrés au client.

## L'évolution du contexte technologique

En matière de logiciels de photogrammétrie, le principal facteur de mutation est l'avènement des capteurs numériques qui, tout en nécessitant des espaces de stockage sans précédent, ont décuplé les flux de données et entraîné une redéfinition profonde des tâches. L'aide apportée par les logiciels est telle qu'un opérateur fait de la photogrammétrie sans le savoir, alors que ses prédécesseurs accomplissaient explicitement chacune des étapes de la chaîne de production. Les différentes phases de la restitution ou de la production d'orthophotos étant en grande partie automatisées, plusieurs opérateurs spécialisés dans les différentes étapes de la production sont désormais remplacés par un seul, de préférence ingénieur. C'est notamment le cas pour l'aérotriangulation rendue plus performante et complexe par l'emploi du GPS. Le besoin de compétences en informatique s'est donc accru. Par exemple, la reconstruction d'une image à large champ à partir de plusieurs images est un travail qui relève à la fois du photographe et de l'informaticien.

Le changement provient également de l'évolution des produits demandés. Par exemple, on ne trace presque plus de courbes de niveau, sauf cas particuliers (surplombs) ou dans des pays qui appliquent des normes traditionnelles. Par ailleurs, des capteurs variés, à l'origine confinés à un usage scientifique



sont à la disposition du photogrammètre en complément de la photographie. Ainsi le Lidar permet d'obtenir rapidement un MNT, ce qui n'en fait pas pour autant un concurrent pour la photogrammétrie, celle-ci restant compétitive grâce à la corrélation automatique et à la lecture intuitive des photographies. De même, la photogrammétrie permet une saisie manuelle d'éléments caractéristiques comme les lignes de rupture ou bordures, repérées visuellement et localisées en trois dimensions. L'infrarouge, qui peut faire l'objet du même traitement que la photographie en termes géométriques, apporte une information radiométrique complémentaire. On assiste aussi à la fusion, dans un même environnement logiciel, de la photogrammétrie et de la télédétection même si, physiquement, celle-ci s'intéresse aux radiométries dans le spectre visible ou non.

Les performances des logiciels peuvent légitimement susciter des inquiétudes quant à la place de l'homme dans la chaîne de production et donc au devenir du métier de photogrammètre en termes d'emploi. Il est vrai que le besoin de main-d'œuvre a diminué. Pourtant il reste du travail au spécialiste, il a simplement changé de nature. La manipulation d'éléments cartographiques exogènes comme la toponymie est difficile à automatiser. Le traitement d'images améliore la lisibilité des photographies mais leur interprétation reste du ressort de l'opérateur. Finalement, l'interprétation des images, qui est la partie la plus noble du métier de photogrammètre, n'a pas disparu.

Si l'on considère les concepts algorithmiques sous-jacents, les logiciels employés sont la filiation directe des reconstituteurs utilisés depuis longtemps par les photogramètres. Cependant, on découvre que la photogrammétrie a été appropriée en parallèle par d'autres domaines et qu'en réponse à des besoins différents, des logiciels de photogrammétrie ont été développés à d'autres fins telle la production de jeux vidéos. Des solutions accessibles sur Internet utilisent même la compensation par faisceaux. Les photogramètres avouent qu'ils connaissent mal ces solutions et qu'une collaboration entre les différents concepteurs serait profitable à tous.

Les évolutions économiques récentes ont conduit à une délocalisation massive de la production. Hormis certains pays non démocratiques d'où les données ne sortent pas, la restitution est devenue un marché ouvert. Ainsi, en France comme dans tous les pays d'Europe, on tend vers une organisation dans laquelle des ingénieurs gèrent des projets délocalisés et assurent en France des tâches à haute technicité comme l'aérotriangulation, tandis que la restitution proprement dite est confiée à des opérateurs peu qualifiés dans des pays où la main-d'œuvre est moins chère et la formation le plus souvent assurée par les distributeurs de logiciels dans le cadre d'une relation fournisseur-client.

Les professionnels considèrent que le respect des règles de l'art permet de garantir la qualité de la quasi-totalité des prestations en photogrammétrie, mais que les maîtres d'ouvrage sont désarmés face à quelques chantiers de mauvaise qualité. L'arrêté de 2003 sur les classes de précision, qui clarifie les responsabilités respectives du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre, est plutôt apprécié par les professionnels qui sont d'accord pour l'appliquer car il assainit la situation. En attendant, les donneurs d'ordre auraient besoin d'information, voire de formation, pour être en mesure de spécifier leurs commandes photogrammétriques dans le contexte technologique actuel.

## La formation

Les besoins de formation ont évolué au gré des mutations technologiques qui ont profondément redéfini les rôles dans l'entreprise. A l'origine, les reconstituteurs analogiques puis analytiques étaient très coûteux, longs à amortir, et par conséquent pouvaient fonctionner presque sans interruption. Les ressources humaines furent souvent organisées en 2/8 voire parfois en 3/8 pour rentabiliser le matériel. Par ailleurs, la nécessité d'une excellente vision stéréoscopique éliminait près des trois-quarts des candidats, n'est plus de mise : cette contrainte disparaît avec les reconstituteurs numériques qui n'exigent plus cette vision stéréoscopique

puisque la corrélation automatique s'y substitue. Face à ces évolutions, le niveau et la nature des tâches ont radicalement changé : l'opérateur n'est plus hyperspécialisé comme il devait l'être auparavant.

La délocalisation de la main-d'œuvre peu qualifiée a fait quasiment disparaître en France le besoin d'ouvriers photogramètres et la formation correspondante. Celui de techniciens supérieurs et ingénieurs s'est maintenu notamment avec le mastère "Photogrammétrie, Positionnement et Mesure de Déformations" (PPMD) stable en termes de recrutement et de débouchés. Le témoignage de la société ATGT confirme la tendance : depuis cinq ans, elle a uniquement recruté des ingénieurs dans le domaine. Toutefois, les tâches confiées aux personnels très qualifiés, précédemment partagées avec des collaborateurs aujourd'hui disparus, ont changé. L'ingénieur doit avoir des bases théoriques solides et replacer la photogrammétrie dans le contexte plus large de la géomatique, avec une formation solide en géodésie et en informatique. Quant au technicien, il doit devenir plus polyvalent et savoir gérer un projet où interviennent des tâches de terrain et devant l'ordinateur.

Pour les deux personnels, on assiste à la disparition de la monoculture photogrammétrique. A la faveur de solutions logicielles qui intègrent des chaînes complètes de production de données, la photogrammétrie devient une composante du système d'information géographique. On attend désormais du photogrammètre outre sa connaissance technique, des compétences en contrôle qualité, la capacité de s'exprimer dans des langues étrangères dans le cadre d'une activité délocalisée ou de prestations à l'export et une grande faculté d'adaptation. Une bonne maîtrise de l'informatique semble être unanimement exigée, car le photogrammètre doit savoir utiliser des logiciels qui évoluent rapidement et prendre du recul par rapport aux "boîtes noires".

Compte tenu de la rapidité des changements, la formation initiale se périmise assez vite et la formation continue joue un rôle de plus en plus croissant alors que l'offre est très insuffisante. A l'IGN





comme dans le secteur privé, les reconversions sont multiples, telle celle des pilotes, devenus sous-utilisés, formés à l'aérotriangulation. La formation par alternance répond à la problématique, mais la taille réduite des entreprises est peu propice à sa mise en œuvre. Les formations "à la demande" restent donc les plus adaptées. Les représentants des organismes de formation regrettent que les fournisseurs ne mettent pas gracieusement leurs logiciels à la disposition des écoles car les enseignants n'ont qu'une connaissance limitée des outils du marché.

## La recherche en photogrammétrie

Dans le domaine de la géomatique en général et de la photogrammétrie en particulier l'organisation de la recherche est très particulière. Du fait du cloisonnement entre l'université et les grandes écoles, c'est dans ces dernières que la photogrammétrie a progressé dans un esprit "arts et métiers". Pour sa part, la télédétection nécessitant un outillage mathématique moindre, a été plus facilement appropriée par les sciences de la nature et les sciences sociales. La comparaison avec les pays voisins montre que les ingénieurs font souvent une thèse alors qu'en France la proportion est de l'ordre de 5 %, ce qui est peu propice au développement de la recherche dans une discipline qui reste l'apanage des écoles d'ingénieurs. Cette situation aboutit à un cloisonnement entre la géomatique, incluant la photogrammétrie, et la géographie universitaire.

Enfin, depuis longtemps, les compétences en photogrammétrie sont pour l'essentiel restées localisées à l'IGN. Le SNEPPIM déplore à ce sujet que l'Établissement public ne mette pas son savoir-faire au service du secteur privé.

## Le point de vue de deux grands organismes publics

L'Établissement de production de données géographiques (EPDG) du Ministère de la défense emploie environ 130 personnes dont 30 civils, sans compter la sous-traitance privée. Contrairement au secteur commercial et pour

des raisons évidentes, l'EPDG ne soustrait pas de production à l'étranger et fait appel à des opérateurs français. La tâche principale consiste principalement à saisir en deux dimensions des informations géographiques sur fond d'orthophoto sachant que la formation classique en photogrammétrie n'est plus suffisante. En effet, l'EPDG a besoin du concours de techniciens aptes à une lecture globale du paysage et qualifiés en photo-identification comme maîtrisant les différents capteurs aéroportés et spatiaux, y compris le radar dans certaines régions du monde. Il se vérifie que double compétence en géomatique et en géographie, y compris en géographie humaine, s'impose.

À l'IGN, le terme "photogrammétrie" a totalement disparu de l'organigramme. Cela révèle la banalisation de la discipline, parfaitement opérationnelle et disséminée dans les autres activités dont elle est devenue l'accessoire. Ainsi, la photogrammétrie intervient dans la mise à jour du Référentiel Grande Echelle (RGE), dans la production de l'orthophoto, de Référence-3D (SPOT-5) et dans le projet Bati-3D de restitution du bâti en milieu urbain. De la photographie argentique scannée répandue dans les années 1990, l'IGN est progressivement passé à la photographie numérique dans les années 2000, évolution qui participe à l'automatisation des chaînes de production. Comme l'EPDG, l'IGN n'a pas vocation à soustraire la production à l'étranger, ce qui incite au développement de procédures les plus automatisées possible.

Cette évolution entraîne toutefois des difficultés :

- l'effet "boîte noire" entraîne une perte de savoir-faire et, partant, la disparition des reconstituteurs très qualifiés tout comme la télédétection automatique a conduit à celle des photo-interprètes,
- l'évolution des résolutions spatiales, le besoin de réduire le nombre de points de calage, etc. exige une adaptation des choix de modélisation, et donc une maîtrise accrue des problèmes de physique qui n'étaient pas posés auparavant.

Dans ce contexte, la production doit être confiée à des opérateurs très qualifiés, voire à des ingénieurs. La pyra-

mide des âges des personnels de l'IGN étant homogène, un recyclage des personnels est nécessaire.

## Perspectives

Cet état des lieux conduit à s'interroger sur les perspectives qui s'offrent au métier de photogrammètre et sur les nécessaires adaptations. Une évolution rapide inquiète toujours, cependant le pessimisme n'est pas nécessairement de rigueur.

Les besoins ont changé, il faut apprendre à les connaître, et offrir la photogrammétrie à de nouveaux marchés. Dans différents contextes opérationnels autant que scientifiques, des professionnels ignorent souvent le bénéfice qu'ils pourraient tirer de la photogrammétrie. La démonstration a pourtant été faite dans des domaines aussi variés que la gestion des risques, l'épidémiologie, l'archéologie.

Par ailleurs, on ne saurait trop recommander un décloisonnement plus franc entre les différents acteurs du monde de la photogrammétrie (professionnels des secteurs public et privé, enseignants), ainsi qu'entre ces derniers et les autres communautés professionnelles. Par exemple, les topographes et photogrammètres gagneraient à s'approprier davantage les retombées de la robotique.

Enfin, il y a urgence à faire évoluer les formations en fonction des évolutions technologiques et économiques de l'époque. La délocalisation massive de la main-d'œuvre vers les pays en développement est une réalité, tout comme le besoin d'une main-d'œuvre moins abondante mais très qualifiée en France. L'offre de formation doit s'y adapter. Sachant que personne ne peut prévoir ce que seront les besoins dans 40 ans, la formation initiale est condamnée à être insuffisante et la formation continue doit donc sans cesse accompagner l'évolution des techniques. La nécessité d'une formation en photo-identification, et au-delà, un rapprochement plus net entre la géomatique et la géographie universitaire ont bien été identifiés. Cette journée aura donc permis de formuler des recommandations en matière de formation et les représentants des écoles en ont pris bonne note. ●

## Métrie appliquée à l'expérience CMS au CERN

### 10 années de photogrammétrie numérique

■ Jean-Frédéric FUCHS – Raphaël GOUDARD – Christian LASSEUR – Jean-David MAILLEFAUD – Aurélie MAURISSET

Présentation de la méthodologie générale appliquée à la métrologie de l'expérience CMS du projet de l'accélérateur LHC au CERN, objet de grandes dimensions, ainsi que les moyens et résultats de la photogrammétrie numérique mise en œuvre au cours de la construction, l'assemblage et le contrôle final de l'expérience.

#### ■ MOTS-CLÉS

Métrie,  
photogrammétrie  
numérique, mesures  
grandes dimensions

*Le CERN, établi près de Genève, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde.*

*Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des*

*constituants et des lois de l'Univers en utilisant des accélérateurs et des détecteurs très complexes pour sonder les particules fondamentales et ultimes de la matière. C'est en étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision que les physiciens appréhendent les lois de la Nature.*

*Le LHC "Large Hadron Collider" est le grand projet actuel du CERN qui, avec un accélérateur collisionneur proton-proton de 27 km de circonférence, comporte quatre grandes expériences. L'une d'elles, CMS, est un détecteur polyvalent pour explorer un large éventail de domaines de la physique.*

*Le Groupe "SU", Métrie des Grandes Dimensions, est responsable du positionnement précis des éléments des accélérateurs, des détecteurs et de la maintenance des alignements selon les besoins fonctionnels, comprenant aussi la métrologie de contrôle qualité de tout composant avant son installation lorsque les méthodes classiques d'atelier sont inadéquates. L'article présente les mises en œuvre techniques de géodésie et photogrammétrie industrielles appliquées à la métrologie de positionnement des éléments constituant l'expérience CMS et les résultats obtenus.*

Le mandat et la responsabilité des géomètres en charge de la métrologie de positionnement des expériences sont de vérifier pour chaque composant, détecteur et structure :

- leur conformité aux tolérances dimensionnelles fixées pour la fabrication

- leur positionnement dans l'enveloppe approuvée et admise pour l'intégration
- leur position conformément à une valeur théorique, en fait relative à la "meilleure" ligne géométrique matérialisée par l'accélérateur définissant le faisceau de particules
- la répétabilité et la reproductibilité de cette position, les éléments, structures porteuses et détecteurs étant modulaires, et ce au cours des divers mouvements de fermetures et ouvertures nécessaires aux installations et maintenances
- la vérification périodique et régulière de la position initiale, à la suite de déformations mécaniques (charges, effets des champs magnétiques...) ou même de mouvements tectoniques.

La métrologie appliquée est donc un véritable défi qui va de pair avec les tolérances plutôt serrées de fabrication et de positionnement, les dimensions impressionnantes, le matériau des objets, fibre de carbone ou structure fragile et légère et enfin la complexité et l'intrication des éléments à mesurer et positionner.

Le détecteur CMS (*Compact Muon Solénoïde*) est construit autour d'un énorme aimant solénoïde, bobine supraconductrice de forme cylindrique générant un champ magnétique de 4 Teslas – environ 100 000 fois le champ magnétique terrestre. Le champ est confiné par une "culasse" d'acier de 22 m de longueur et 14 m de hauteur qui constitue la plus grande partie des 12 500 tonnes du détecteur. Cette culasse est sectionnée en 11 roues, chacune portant et contenant des éléments de détection. Contrairement aux autres détecteurs du LHC, construits sous terre, CMS a été construit en surface et chaque section, une fois assemblée, emplie de détecteurs et mesurée, est ensuite descendue dans la caverne pour y être alignée, l'une par rapport à l'autre et l'ensemble par rapport à la géométrie de l'accélérateur.

La problématique de CMS est donc que chacune de ces roues doit coïncider l'une par rapport à l'autre en formes, dimensions et positions dans "le" millimètre et en plus positionnée par rapport à la ligne faisceau dans le même millimètre.

Voici donc la belle histoire des géomètres, de la photogrammétrie numérique et de CMS !

## Le CERN et le LHC

Le CERN est aujourd'hui l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire. L'acronyme institué en 1952 pour "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire", qui avait pour mandat de créer en Europe une organisation de rang mondial pour la recherche en physique fondamentale, a été abandonné lorsque le laboratoire vit officiellement le jour, en 1954 mais il fut toutefois conservé. A ce jour, notre compréhension de la matière va au-delà du noyau, et le principal domaine de recherche du CERN est la physique des particules, à savoir l'étude des composants fondamentaux de la matière ainsi que des forces auxquelles ils sont soumis.

Les instruments principaux sont les accélérateurs qui portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes pendant que les détecteurs de particules observent, enregistrent et analysent.

Le grand projet actuel du CERN est le grand collisionneur proton-proton, le LHC. C'est un gigantesque accélérateur de particules, à environ 100 mètres sous terre, quasi circulaire de 27 km de circonférence, avec lequel les physiciens vont étudier les plus petites particules connues : les composants fondamentaux de la matière. Le LHC, en mettant deux faisceaux de protons accélérés chacun à des énergies de 7 TeV, en collision frontale soit donc à une énergie de 14 TeV au centre de masse, jamais atteinte auparavant, permettra aux physiciens de pénétrer encore plus profondément dans la structure de la matière et de recréer les conditions qui régnaient dans l'Univers juste dans les  $10^{-16}$  secondes qui ont suivi le "Big Bang" – voir figure 1.

Le LHC va révolutionner notre compréhension du monde, de l'infiniment petit, à l'intérieur des atomes, à l'infiniment grand à l'échelle de l'Univers. L'accélérateur entrera en service courant 2008. Le principal résultat attendu est la découverte d'une encore hypothétique "particule" responsable de

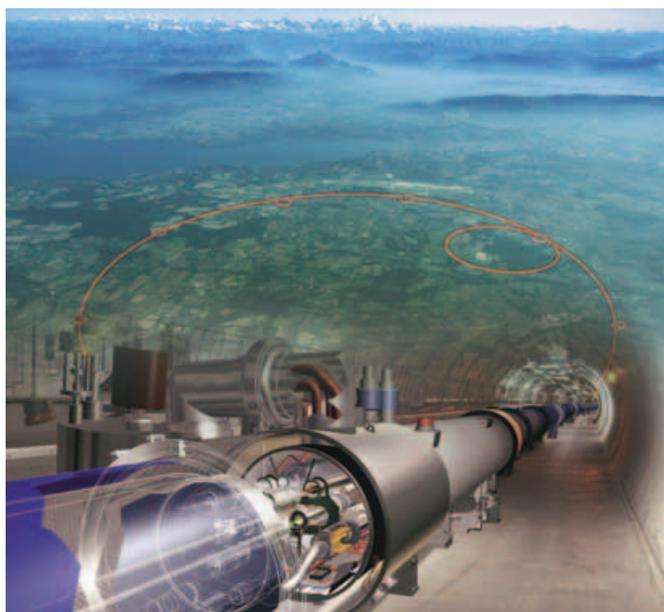


Figure 1. Vue d'artiste du LHC.

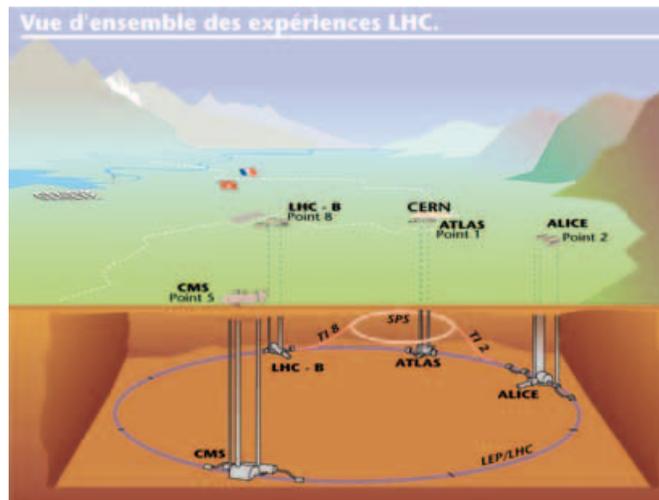


Figure 2. Répartition des expériences LHC.

la masse, déjà baptisée boson de Higgs du nom du physicien théoricien écossais auteur de la théorie prévoyant son existence. Un futur Prix Nobel ?

Quatre grandes expériences : ALICE, ATLAS, CMS et LHCb sont en phase finale d'installation 100 m sous terre sur le parcours du LHC et au lieu des futures collisions – voir figure 2.

La physique nécessite pour la reconstruction des trajectoires et la reconnaissance des particules des tolérances très serrées de positionnements relatifs des détecteurs de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  à 200  $\mu\text{m}$ , avec des incertitudes en écart-type inférieures à 50  $\mu\text{m}$  en alignement interne et une incertitude en écart-type en alignement externe des différents composants, supports et détecteurs, par rapport à la géométrie de l'accélérateur comprise entre 0.3 mm et un maximum de 1 mm. Certaines opérations de métrologie par photogrammétrie ont dû être réalisées avec une incertitude en écart-type de 20  $\mu\text{m}$ .

## L'expérience CMS et méthodologie de la métrologie

### Description

Toute expérience en physique des particules comporte plusieurs degrés de détecteurs, chacun étant spécialisé en un type de mesures : les détecteurs centraux, en fait les premiers touchés lors des collisions, déterminent la quantité de mouvement des particules produites, produit de la masse par la vitesse, les calorimètres à l'extérieur déterminent leur énergie.

Le tout est disposé dans et autour du plus grand champ magnétique possible fourni par une bobine et une culasse afin de courber les particules chargées électriquement et étudier leur trajectoire qui est en fait leur carte d'identité pour un champ magnétique donné.

Ainsi CMS – voir figure 3 – est un solénoïde supraconducteur de 4 Teslas, composé de 15 blocs quasi cylindriques de plus de 1000T chacun, soit :

- 5 roues "Yoke Barrel" YB (4 de 1500T chacune), la roue cen-

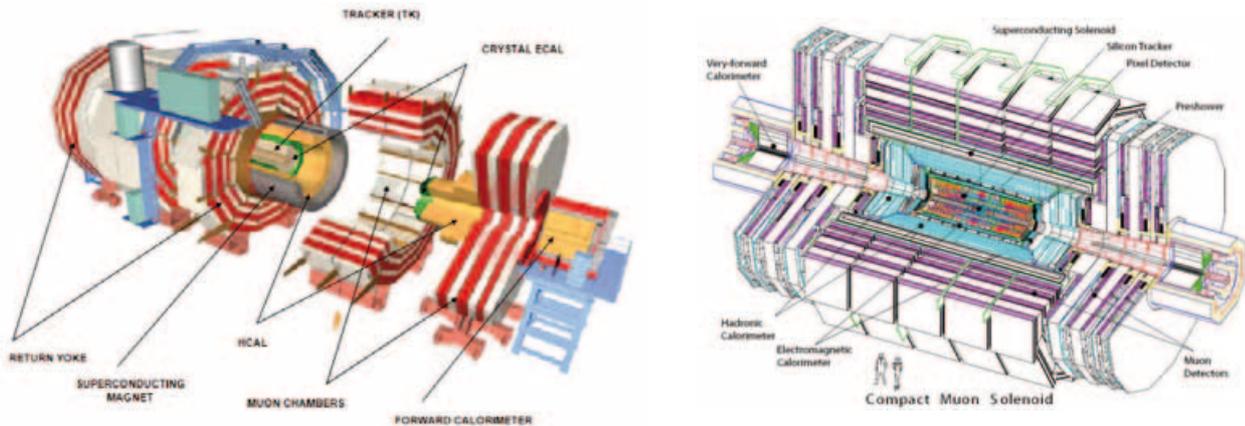


Figure 3. Configuration ouverte (installation) et fermée (fonctionnement) de CMS.

trale (YB0, 2000 T) supporte la bobine (Superconducting Magnet) dans son cryostat, celui-ci servant de supports aux calorimètres (HCAL et Crystal Ecal) et au détecteur central (Tracker :TK), cylindre central de 8 m de long et 3 m de diamètre, considéré comme un objet "rigide" à 30 µm.

- 6 disques "Yoke Endcap" YE placés par ensemble de 3 disques indépendants à chaque extrémité ferment CMS.
- ces 11 éléments forment la culasse de l'aimant (Return Yoke) servant aussi de blindage le calorimètre. Elle est constituée de couches de plaques de fer (structure en sandwich) entre lesquelles sont disposés des détecteurs pour mesurer les muons (Muon Chambers), particules qui interagissent très peu et donc très utiles pour reconstituer les trajectoires enregistrées dans le détecteur central.
- les calorimètres extérieurs (Forward Calorimeter) sont indépendants et complètent les mesures des énergies pour les particules émises sous de petits angles.

Chaque roue "Barrel" (YB) et disque "Endcap" (YE) repose sur des pieds indépendants (Feet) permettant l'alignement individuel mais, une fois aligné, chacun de ces éléments est attaché l'un à l'autre par des vérins venant assurer la fermeture et la rigidité de l'ensemble des "Yokes".

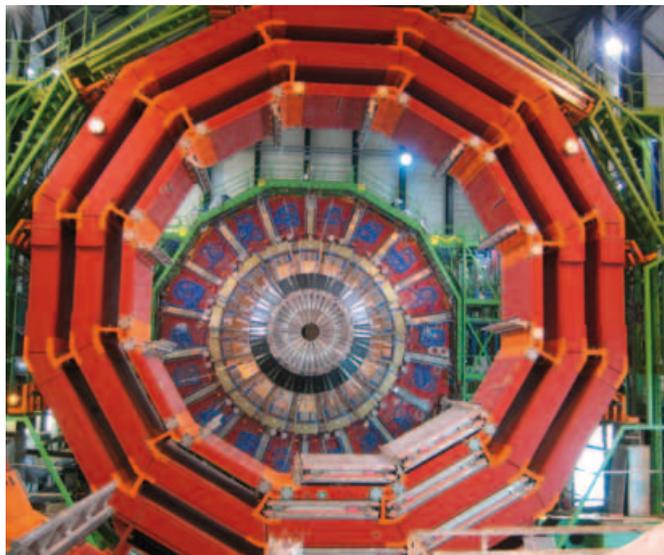


Figure 4. Roue Barrel (YB) et disque Endcap (YE) en cours de remontage au CERN.

Chaque étape de montage de chaque YB, un assemblage de 36 plaques reliées par des cornières, et de chaque YE, ici 12 secteurs circulaires boulonnés entre eux, a été suivie et contrôlée par photogrammétrie, les dimensions la justifiant pleinement ainsi que les plannings, d'abord en usine (Allemagne et Japon) lors des montages à blanc puis lors des remontages en hall de surface – voir figure 4.

### ■ Procédure dite des "poupées russes"

L'arrangement de CMS dit encore en peau d'oignon avec toutes ces couches successives de détecteurs, est comparable à une énorme poupée russe renfermant les autres plus petites jusqu'à la plus minuscule.

La difficulté est qu'ici, au lieu de commencer par cette dernière comme dans le jeu des "poupées russes" en finissant par la plus grosse, pour réaliser le montage final, on doit commencer la plus grosse, celle-ci venant alors recouvrir la suivante immédiate et "légèrement" plus petite qui, à son tour, recouvre la suivante, jusqu'à la "minuscule", la plus critique puisque, placée au centre du tracker, elle est aussi la plus précise car elle voit toutes les particules créées lors des collisions.

Les physiciens attendent des géomètres la livraison des positions relatives 3D des différentes couches de détecteurs jusqu'au cœur de l'expérience.

En fait, chaque élément à positionner comporte des marques fiducielles extérieures (trous de référence qualité H7/G7) connues dans le référentiel propre à l'élément, c'est-à-dire reliées géométriquement à la partie sensible du détecteur, soit par construction soit par mesures de calibration-fiducialisation par divers moyens tels que machine "à coordonnées" ou laser tracker ou photogrammétrie.

Les mesures de ces références extérieures, visibles, accessibles au moins une fois et si possible permanentes, dans un référentiel donné, soit par rapport à un autre objet environnant, une autre poupée, soit par rapport à un référentiel général lié à la géométrie de l'accélérateur, la poupée la plus extérieure, donnent donc le positionnement, soit relatif soit absolu, soit même les deux si le contenant est déjà connu dans le système général.

Le jeu consiste donc à associer pour adaptations tridimensionnelles successives des fichiers de construction des détecteurs



► (données internes), des fichiers de calibration-fiducialisation, des fichiers de mesures relatives et référencés à un système local et/ou général, avec à chaque étape une analyse raisonnée des écarts d'adaptation dus soit à des déformations locales et/ou générales soit aux différentes configurations non reproductibles a priori soit, bien sûr et le plus souvent, à ces deux effets conjugués, ce qui complique sérieusement la discrimination déformation réelle-corrélation des différentes "précisions" d'une adaptation à l'autre.

Les physiciens souhaitent connaître la position de tous ces éléments une fois l'expérience CMS fermée et installée dans la caverne par rapport à un même référentiel appelé "système physicien" déterminé par le point d'interaction des collisions au cœur de l'expérience et les directions des faisceaux proton-proton entrant en collision.

Ainsi et afin de répondre à ces besoins des analyses "en ligne" des trajectoires de particules dans le champ magnétique, caractéristiques de leur quantité de mouvement (*momentum*) et de leur énergie, un système de surveillance interne des positions relatives d'un grand nombre de détecteurs est installé, inspectant en cours de fonctionnement chaque élément d'une même couche ainsi que la liaison avec, au moins, les deux couches adjacentes.

Ce système propre à CMS, est basé sur un arrangement approprié de caméras digitales montées et calibrées sur des supports en fibre de carbone (MAB : Muon Alignment Barrel) au nombre de 36 répartis dans les 5 roues Barrel YBs et regardant les 250 chambres à muons et faisant la liaison optico-géométrique avec les chambres des Endcaps YEs et le central tracker TK – voir figure 5.

Le groupe a largement contribué au concept de ce type de contrôle unique, son intégration dans l'environnement de l'expérience, sa calibration et sa mise en place et aux mesures correspondantes. Là aussi la photogrammétrie a été l'instrument idéal à tous les niveaux de contrôles et mesures.

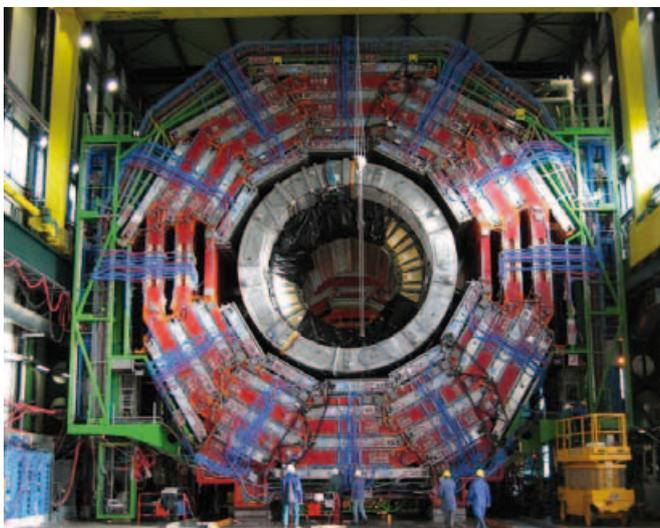


Figure 5. Fin du montage des roues Barrel - Chambres à muons et MABs (structure noire).

Enfin, l'expérience CMS étant un ensemble de près de 160 laboratoires et Universités répartis entre 36 nations du monde entier et réunissant 2 100 scientifiques et ingénieurs, la conception et le suivi industriel de bon nombre de composants ont été en fait supervisés par les différentes collaborations, le lieu de fabrication n'étant d'ailleurs pas toujours dans le pays d'origine de la collaboration en charge, certaines parties ayant été fabriquées dans des pays ne participant pas directement à l'expérience.

Cette approche, nécessaire vu l'ampleur du projet, a amené le groupe à intervenir régulièrement en usine (Japon, Corée du Sud, Allemagne, Russie, Grèce, Italie, Espagne, Portugal...) à la demande des responsables de projet pour des mesures de métrologie à différents stades, depuis les tests de déformation de prototypes, puis les validations géométriques des modèles individuels finaux et enfin, pour les objets modulaires tels que les YBs et YEs, aux mesures d'acceptation des pré-assemblages "à blanc" en usine avant démontage et expédition au CERN. Ainsi près d'une centaine de fois en 3 années, les géomètres sont partis en mission emmenant avec eux une petite valise contenant la caméra numérique et les accessoires indispensables.

## ■ Les moyens à disposition et les principes d'utilisation

Ils sont basés sur les techniques de mesures et maintenance des réseaux tridimensionnels, complétées par la photogrammétrie numérique avec des adaptations, hardware et software, pour le traitement des objets de grandes dimensions y compris l'utilisation du laser tracker pouvant être conjoint avec la photogrammétrie, la micro-triangulation de bancs de calibration-fiducialisation et la mise en œuvre d'instrumentation en complément des réseaux spatiaux. Ainsi des équipements spécifiques, caméras électro-optiques "angle monitoring" (BCAM), capteurs hydrostatiques capacitifs (HLS) et clinomètres électroniques viennent compléter la "boîte à outils" des moyens traditionnels de "survey" pour des applications bien déterminées. Les liaisons géométriques de ces instruments spéciaux avec les détecteurs étant connues par calibration et adaptation, ceux-ci sont tous intégrés dans la métrologie générale de CMS et servent à la surveillance extérieure permanente des positionnements relatifs et absolus des YBs et des YEs qui sont les vrais contenants physiques des détecteurs.

Les supports informatiques de traitement vont de pair avec les moyens techniques de terrain auxquels ils sont connectés électroniquement. Ils sont adaptés pour des prises de données rapides et des analyses sur place, aucune opération n'étant close avant sa validation et le départ du lieu de mesures. Citons par exemple la récapitulation des mesures faites et le contrôle de la redondance par point et station puis le calcul en bloc, le contrôle du contraste des premières photos suivant les paramètres de réglage, la visualisation des stations de caméras par rapport à l'objet mesuré pouvant conduire à un complément de prises de vues dans les situations difficiles (encombrement, angles morts, masques), le calcul "en libre" des coordonnées image en fin d'acquisition.



Figure 6. Caméra D2X et flash annulaire.

## Système de photogrammétrie numérique au CERN

### ■ Description et caractéristiques du système

Le CERN a fait l'acquisition d'un système de photogrammétrie numérique en 1998 dès l'apparition sur le marché des premières caméras numériques à cette époque à grande résolution 6 millions de pixels DCS 460 puis DCS 660, le tout piloté avec le software DPA-Win-Aicon. De nombreux projets de fin d'études en collaboration avec les Ecoles et Universités européennes, ainsi que des participations à des projets de recherche et développement industriel ont permis d'apprivoiser les techniques et de les adapter aux besoins et contraintes inhérentes aux grandes dimensions – voir figure 6.

Les effets de l'instabilité des boîtiers, des optiques et des "chips" ont été étudiés et quantifiés, en particulier la transmission des erreurs dans les cas où seuls certains points très dispersés sont à mesurer, là où on doit assurer le bon recouvrement des prises de vues en arrangeant judicieusement les points auxiliaires de contrôle et les barres d'étalonnage. Le système a été remplacé par des caméras D2X 12,4 millions de pixels plus stables, plus performantes et équipées de communications WLAN puis complété avec des logiciels plus rapides tels que 3D STUDIO-Aicon.

Une grande variété de types et de tailles des cibles rétro-réfléchissantes, fabriquées à la demande par Géodésie Maintenance Services (G.M.S) telles que boutons, sphères (très utiles lorsque les espaces autour de l'objet sont restreints) étiquettes, plaques codées et plaques codées trouées pouvant être mises autour d'une cible bouton la rendant ainsi codée, permet d'opérer jusqu'à 20 m de l'objet, les objectifs les plus utilisés étant les 20 mm et 24 mm. De nombreuses barres étalons en fibre de carbone (de 0.5 m à 1.5 m), certaines en forme de croix définissant un référentiel initial, régulièrement étalonnées avec une machine à coordonnées, peuvent être disposées dans diverses directions lors des prises de données, ce qui aide très efficacement le contrôle et l'analyse de la propagation des erreurs. Les codes sont définis sur 14 et 20 bits ce qui autorise respectivement un jeu de 520 et près de 10 000 désignations différentes – voir figure 7.

Les précisions généralement atteintes sont de l'ordre de 1/30 à 1/50 pixel, un grand soin étant toujours donné à l'obtention des meilleurs recouvrements et donc la plus grande surabondance possible, le tout pour un nombre raisonnable de prises de vues, les conditions d'opérations n'étant elles pas toujours favorables au vu de l'encombrement des zones et le peu de place d'évolution autour de l'objet.

Le software utilisé permet dans certaines conditions de réglage, de reconnaître avec une précision de l'ordre de 1/20 pixel, des cibles codées imprimées sur papier non rétro-réfléchissant, donc produites à bas coût, ce qui peut "dépanner" quelquefois quand un très grand nombre de cibles est nécessaire (mesures de profil, surface, enveloppe, supports de structure) et que la haute précision n'est pas exigée.

### ■ Mise en œuvre et résultats d'une opération de photogrammétrie

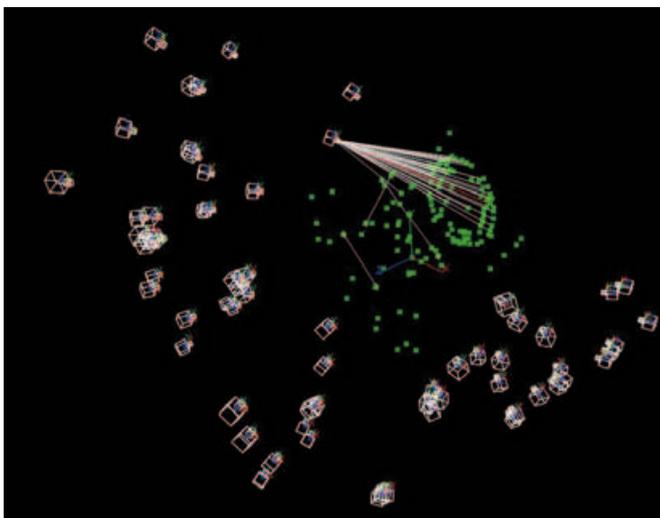
Un projet de photogrammétrie comporte plusieurs étapes :

- Équiper les marques fiducielles de l'objet de cibles rétro-réfléchissantes, si possible codées ou les entourer de plaques codées trouées.
- Disposer les points de contrôle communs (au minimum 7 étiquettes codées) aux prises de vues successives de recouvrement régulier horizontal et vertical. Cette délicate opéra-



Figure 7. Divers types de cibles photogrammétriques (Aicon et G.M.S) et barre en croix.

- tion demande un savoir-faire certain, particulièrement lorsque toutes les faces, ni toujours planes ni régulières doivent être liées entre elles. La précision finale dépend largement de la densification et la disposition de ces points et le jeu consiste à ce que tous les points vus depuis une même station remplissent le format, ce qui dépend principalement des distances d'opération et des espaces d'évolution autour de l'objet. Les cibles-sphères, soit centrées dans un trou de référence, soit montées sur un support magnétique en points de contrôle, permettent un large angle de prises de vues en réduisant ainsi de possibles erreurs d'excentricité des cibles circulaires boutons ou étiquettes dues à des prises de vues trop rasantes. Le choix, quand on peut, du lieu d'opération est donc primordial en sachant bien qu'a priori, il est peu recommandé, même si possible, d'ajouter des points de contrôle en cours de prises de vues.
- Disposer les barres de mise à l'échelle (au moins 2) et les répartir dans le volume de l'objet suivant des directions spatiales différentes. Ces barres en fibre de carbone (1.50 m) ne sont pas adaptées à la mise à l'échelle pour un objet de grandes dimensions supérieures à 10 m (roues YBs et YEs). C'est pourquoi on complète par des mesures de grandes distances prises sur l'objet lui-même soit avec un disto chaîne/fil (précision : 0.2 mm) soit directement par triangulation locale (précision : 0.3 mm).
  - D'effectuer et contrôler les prises de vues. Elles sont volontairement sous-exposées afin d'avoir le meilleur contraste (paramètres : f/16 ou f/22 et vitesse : 1/250). Tout comme la disposition des points de contrôle et des barres, la précision finale dépend de cette opération. Cela suppose de laisser la caméra au repos au sortir de sa valise avec mise en température avant toute manipulation (moins sensible avec les D2X), de contrôler en début d'opération le contraste, de pouvoir opérer avec un format bien rempli avec le recouvrement horizontal et vertical au mieux, s'assurer du blocage de la focale et des retournements et déversements réguliers de la caméra.
  - le software 3D STUDIO permet de visualiser en cours d'opération les photos prises, les positions des caméras, le nombre



**Figure 8.** Visualisation spatiale des stations de caméras, des rayons de prises de vues et des répartitions des distances et barres de contrôles – 3D STUDIO.

de rayons passant par chaque cible, ainsi que le déroulement du calcul si, au préalable, les premières photos ont englobé une barre en croix définissant ainsi un référentiel de départ. Toute intervention supplémentaire au vu des répartitions et résultats partiels est donc possible – voir figure 8.

- Les paramètres de prises de vues sur cibles "papier" non réfléchissantes doivent être correctement adaptés à l'environnement et aux distances moyennes d'opération, l'ouverture dépendant des conditions d'éclairage et de la nécessité de "flasher". Des ouvertures de 5.6 à 8, pour des vitesses d'exposition de 1/125 et un nombre ISO (sensibilité du capteur) réglé à 300 et utilisation du flash à 1/2 sont les paramètres le plus souvent retenus, les résultats finaux, pour un objet "moyen" et dans de bonnes conditions, n'étant alors pas significativement différents de ceux obtenus avec des cibles rétro-réfléchissantes. Enfin, si on dispose d'un fort éclairage, on peut mêler cibles rétro-réfléchissantes ou non.
- Traiter et analyser les données finales. L'interface WLAN – portée 12 m environ – permet le traitement et contrôle quasi "on-line" sur le terrain. Le calcul approché et itératif des positions successives des caméras et des points dans l'espace s'opère dès la troisième photo si on a pris soin d'incorporer la barre en croix dans les premières prises de vues, la compensation par les moindres carrés par la méthode des faisceaux convergents s'appliquant au fur et à mesure affinant ainsi les résultats jusqu'à la dernière prise de vue. Le calcul final est validé à la suite de l'obtention et l'analyse des coordonnées "image" et de leurs écarts-types, des valeurs des paramètres internes d'auto-calibration de la caméra, aussi de leurs écarts-types (focale, coordonnées point principal, radial symétrique plus tangentiel et asymétrique distorsions de l'objectif, échelle et cisaillement du chip), des coordonnées tridimensionnelles "objet" après mise à l'échelle, transformations finales dans le référentiel choisi, analyse des résidus et des ellipses d'erreurs données en écart-type.

L'option FiBun (*Finite Element Bundle Adjustment*) de 3D STUDIO-Aicon permet de modéliser la non-planéité du chip. Une grille de correction type "raster" est appliquée suivant un pas de 2.35 mm et tend à réduire les effets des distorsions en bordure de format. Le gain en précision peut être de l'ordre de 40% mais l'application de cette facilité demande des excellentes densité et répartition de points et un plus grand nombre de prises de vues, pas toujours réalisables suivant les formes de l'objet.

- Enfin déséquiper l'objet, ranger les cibles et étiquettes codées, d'où l'importance d'avoir des jeux de codes collés sur des feuilles magnétiques ou supports carton facilement récupérables et réutilisables.

Malgré les étapes d'installation et de rangement qui peuvent être longues et fastidieuses, la photogrammétrie en fonction des dimensions, nombre de points, de l'espace disponible et du temps d'immobilisation alloué de l'objet à mesurer, s'impose par sa souplesse d'utilisation, sa mobilité, sa précision contrôlée et la rapidité de traitement. Cette méthode de mesure a marqué un tournant dans la métrologie des quatre expériences LHC, autant en laboratoire et usine en lieu et place d'autres moyens mécaniques de contrôle que lors des réassemblages et positionnements finaux.

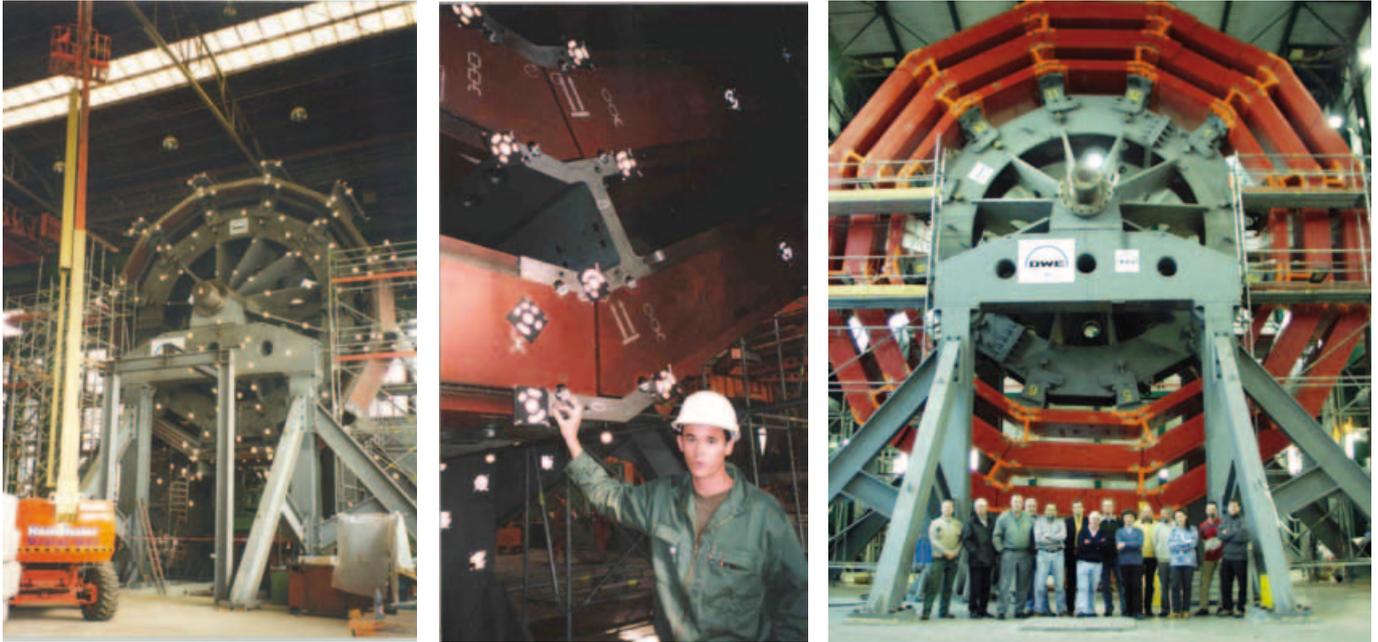


Figure 9. Contrôle en usine (Allemagne) cibles codées magnétiques et sphères rétro-réfléchissantes (production G.M.S) et premier remontage au CERN (2000).

## Exemples d'application et résultats

Les "précisions" des résultats sont exprimées en valeurs moyennes d'écart-types donnés pour un intervalle de confiance à 95 %.

### ■ Contrôles de fabrication des roues Yoke Barrel YBs (1999-2001)

Chronologiquement, ce furent les premiers objets de grandes dimensions – chaque roue fait 14 m de diamètre – traités en photogrammétrie par le CERN et à eux seuls, ils ont justifié pleinement l'utilisation et l'achat d'un système complet. Le projet était de mesurer à des étapes données de montage en usine en Allemagne les 5 roues, chacune montée l'une après l'autre sur un chevalet support d'un gabarit de montage et un mandrin de centrage.

Chaque roue est un assemblage de 3 couronnes circulaires, constituées chacune de 12 plaques, et des doubles cornières font la liaison mécanique entre les plaques adjacentes et les couronnes. Ces cornières, de 2.50 m de longueur, en fait l'épaisseur de la roue, sont repérées par 6 trous de précision, 3 pour chaque face, connus par rapport aux faces de contact avec les plaques et pratiqués avec précision lors de leur usinage : la position spatiale de chaque cornière, liée aux plaques, donne ainsi la géométrie couronne par couronne puis de l'ensemble de la roue et les coordonnées relevées donnent les écarts par rapport à la figure théorique. La tolérance contractuelle d'assemblage d'une roue a été fixée à l'intérieur d'une enveloppe générale réelle "telle que construit" limitée à 5 mm "min/max". Les contraintes de temps, d'espace et de configuration ont conduit à effectuer les prises de vues depuis une nacelle élévatrice, permettant des stations à 18 m du sol et des vues plongeantes englobant les 2 faces de la roue.

Plutôt que des simulations théoriques, une maquette au CERN d'un peu moins 2/3 de roue constitué d'un empilage de blocs de béton a servi à établir la procédure de mesure en fonction de l'espace alloué, de choisir la bonne focale en fonction des distorsions connues, des distances d'opération et de la taille de l'objet puis de tester divers types de cibles et plaques codées correspondantes et disposées autour des cibles boutons et finalement à définir la séquence de prises de vues pour connecter les deux faces de l'objet en un nombre minimum d'images – voir figure 9.

Afin d'assurer une précision objet maximale générale de 0.2 mm avec la DCS 420 6 millions de pixels, seule disponible à cette époque, et un objectif de 20 mm, un diamètre de 40 mm de partie rétro-réfléchissante des cibles avait été adopté à 40 mm garantissant un minimum de 5 pixels touchés pour des distances maximales d'opération de 16 m. L'utilisation des cibles sphères rétro-réfléchissantes, aussi de 40 mm, ont permis d'éviter des prises de vues trop rasantes et d'opérer les liaisons photogrammétriques entre les faces dans les conditions optimales de convergences.

Le matériel en usine a comporté 240 cibles boutons référence, autant de plaques codées sur support magnétique trouées et entourant ces références plus 200 autres plaques codées magnétiques et près de 100 cibles sphères montées sur des queues magnétiques.

La mesure a demandé un minimum de 300 clichés – 100 photos par face plus une centaine pour les connexions, l'ajout de 12 barres d'échelle de 1.50 m calibrées à 10 µm en écart-type plus la mesure à l'aide du disto-chaîne d'une quinzaine de grandes distances de 8 m à 13 m à 0.2 mm en écart-type pour compléter la mise à l'échelle. Chaque opération – une quinzaine de fois – prenait 4 heures de prises de vues mais nécessitait 2 heures de "ciblage" et presque autant de démontage, la lec-

ture des photos noir et blanc en format bitmap non compressé puis le calcul et l'analyse prenant à l'époque avec le programme DPA-Win lui aussi quelques heures. Les positions dans un même référentiel objet des 240 points des cornières de liaison ont montré que les 5 roues avaient été construites en usine dans une enveloppe extérieure réelle de 3 mm, les corrections ayant été bien appliquées lors des contrôles partiels couronne après couronne. Les résultats ont vérifié que les précontraintes appliquées étaient correctes puisque, chaque roue, démontée puis réassemblée au CERN avec l'outillage de l'usine, validée de nouveau, devait être libérée du mandrin central et une fois reposée sur ses pieds, remesurée et vérifiée comme ayant la forme la plus exacte sous son propre poids par rapport à la théorique. L'incertitude spatiale obtenue sur l'ensemble de chaque roue a été conforme aux prévisions de la maquette autant en usine que lors des contrôles au CERN, soit 0.2 mm en écart-type, voire même 0.1 mm en écart-type pour les points d'une même face. Ces valeurs, bien meilleures que celles demandées pour la construction des roues, ont permis que les points des cor-

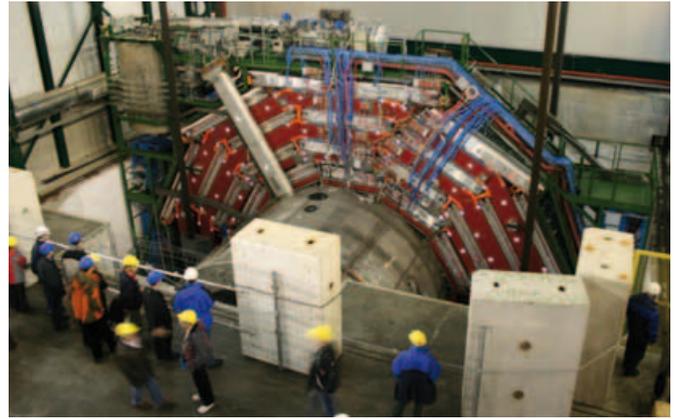


Figure 10. Descente du YB0 (noter les cibles) - Février 2007.

nières constituent l'ossature métrologique "objet" de référence pour le positionnement des détecteurs venant entre les plaques et à l'intérieur de la roue centrale YB0 et demandant des précisions submillimétriques. Il y avait donc dès le départ un intérêt évident à avoir et maintenir la meilleure métrologie possible attachée à chaque roue.

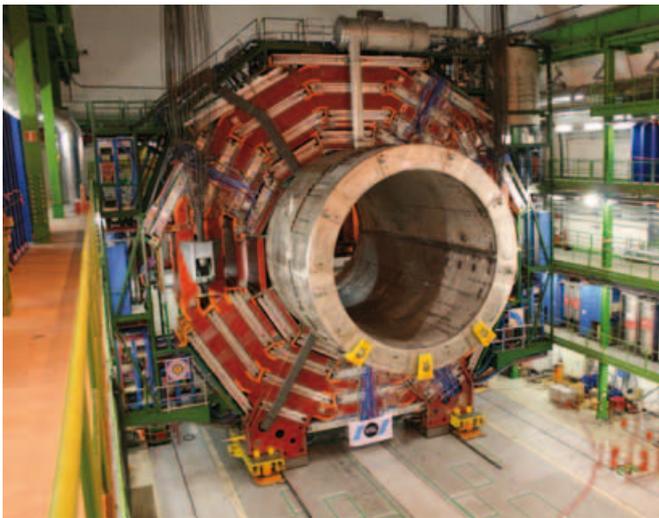


Figure 11. Positionnement YB0 depuis le réseau et photogrammétrie d'ensemble des YBs.

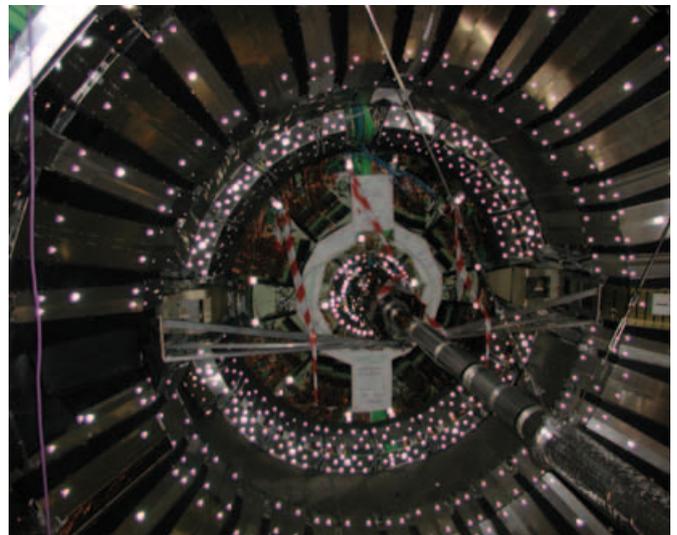
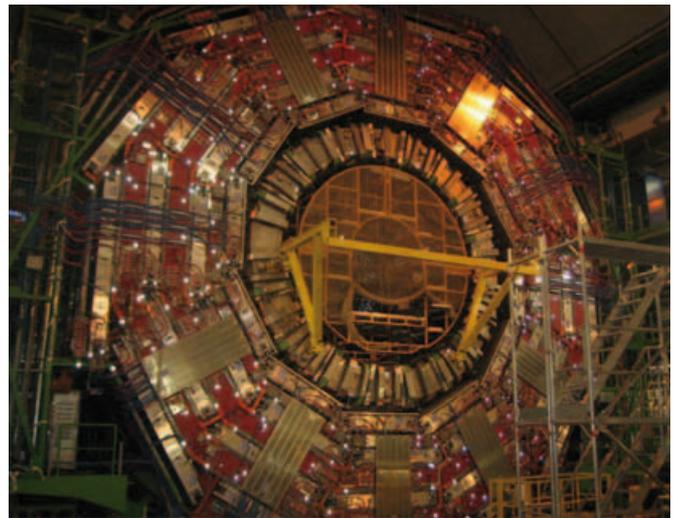


Figure 12. Photogrammétrie locale roue extérieure (YB), central tracker (TK) et calorimètre.



### ■ *Positionnements des roues Yoke Barrel YBs et des détecteurs contenus*

Les 5 roues, déjà équipées des chambres à muons, ont été descendues début 2007 dans la caverne. Chacune a été remesurée pour rendre compte des déformations possibles après descente, un "tassement" maximum de 1.5 mm ayant été enregistré, déterminer une nouvelle géométrie de référence de l'objet et sa position dans le référentiel lié à la géométrie de l'accélérateur – voir figure 10.

Le recul plus limité en caverne après les descentes de tous les éléments a conduit à remplacer les cibles de 40 mm par des cibles permanentes de 20 mm qui équipent maintenant toutes les roues YBs et disques YEs.

Les coordonnées relatives tridimensionnelles des détecteurs connues dans le référentiel objet des roues les contenant et mesurées lors de leur insertion en surface ont été transformées par ajustement spatial en coordonnées définitives dans le référentiel général de l'accélérateur via des mesures géodésiques depuis le réseau de base matérialisé par plus de 80 références aux murs de la caverne (potences "plug-in", mires permanentes) et rattaché aux références géométriques de la machine qui ont servi aux alignements précis de ses composants.

Les coordonnées spatiales des détecteurs descendus ensuite (compléments des systèmes MABs d'alignement interne des chambres à muons, calorimètres HCAL et CRYSTAL ECAL, détecteur central TK) et contenus dans les YBs et YEs déjà connus dans le référentiel général ont été mesurées par des photogrammétriques locales rattachées aux référentiels des contenants, assurant ainsi une excellente précision locale relative inférieure à 0.2 mm en écart-type. L'incertitude générale de positionnement de tout détecteur ou autre dans le référentiel général de la machine est donnée et vérifiée à 0.5 mm en écart-type – voir figures 11 et 12.

### ■ *Positionnements des disques Yoke Endcap YEs et des détecteurs attachés*

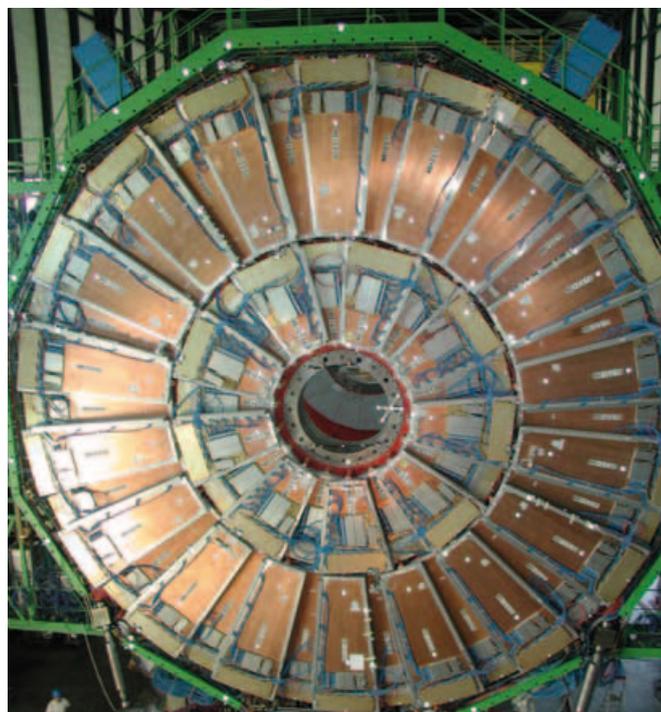
La métrologie de contrôle de fabrication des 6 disques YEs a permis de tester une utilisation à distance du système lors des montages à blanc et des validations qui ont eu lieu à Kobé au Japon où chacun des 12 demi-disques de 14 m de diamètre,



**Figure 13.** Validation en usine d'un 1/2 disque et remontage au CERN en position verticale.

composé de 10 secteurs boulonnés, a été contrôlé en position couchée par photogrammétrie. Le projet supposait que le personnel soit formé à la préparation et à la prise de vues et puisse opérer suivant une procédure établie sur place lors du premier contrôle, envoyer les photos au CERN où elles étaient vérifiées (recouvrements et formats corrects, distances d'opération respectées etc), puis traitées jusqu'aux résultats finaux. Cet exemple de transfert de technologie réussi, a montré la facilité d'apprentissage du système.

Les disques remontés au CERN et contrôlés, les détecteurs à muons disposés en secteurs une fois ajustés couche après couche sur leurs supports, ont été mesurés, une précédente mesure de ces derniers ayant permis de valider les systèmes d'accrochage et de minimiser les temps de mise en place suivant un schéma précis. Les incertitudes de toutes les mesures se sont révélées mieux que 100 µm en écart-type, les configurations étant très favorables malgré les dimensions de l'objet – voir figures 13 et 14.



**Figure 14.** Montage des détecteurs à muons (hall de surface) et installation finale en caverne.

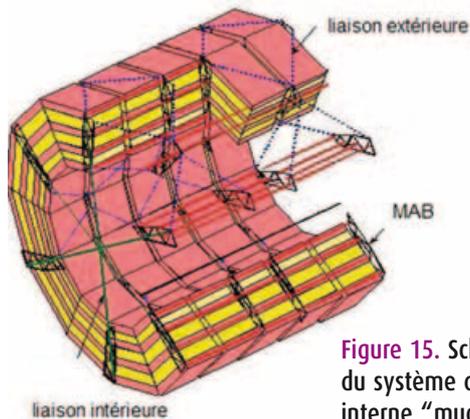


Figure 15. Schéma d'ensemble du système d'alignement interne "muon barrel".

## ► ■ Photogrammétries et Métrologies particulières

Dans l'expérience en cours, les positions relatives des 250 détecteurs à muons "Barrel" des YBs et des 540 "Endcap" des YEs sont inspectées à  $200\ \mu\text{m}$  en écart-type près par un système d'alignement interne. Les chambres "Barrel" ont été fiducialisées spécifiquement, chaque coin comporte 1 cible extérieure photogrammétrique, les 4 devant être liées à des diodes lumineuses LED internes au détecteur et vues par des caméras CMOS montées sur des structures spécifiques (MABs). Les 5 roues YBs fermées, la disposition des structures recrée un schéma de triangulation active et redondante, chaque coin pouvant être vu d'au moins 2 MABs différents – voir figure 15.

La photogrammétrie (D2X et 3DSTUDIO-Aicon) a été intensivement utilisée pour déterminer les positions relatives des cibles, des diodes et des caméras via un banc de calibration électro-optique, périodiquement contrôlé avec la photogrammétrie et le laser tracker LTD 500. Chaque MAB a été validé en laboratoire (dimensions et déformations "tel que construit", détermination des logements des caméras CMOS) avant son transport et sa calibration au CERN. Après installation des détecteurs et détermination dans le référentiel de la roue correspondante, chaque MAB a été ajusté suivant le schéma proposé puis mesuré dans le référentiel de la roue. Un ajustement tridimensionnel type Helmert considérant comme "passives" toutes les coordonnées relatives aux MAB (validation et calibration), toutes les coordonnées relatives aux chambres (fiducialisation et positionnement dans chacune des roues lors de leur montage) et toutes les coordonnées relatives à chaque roue (validation et contrôle) et comme "actives" les coordonnées des points de contrôle de

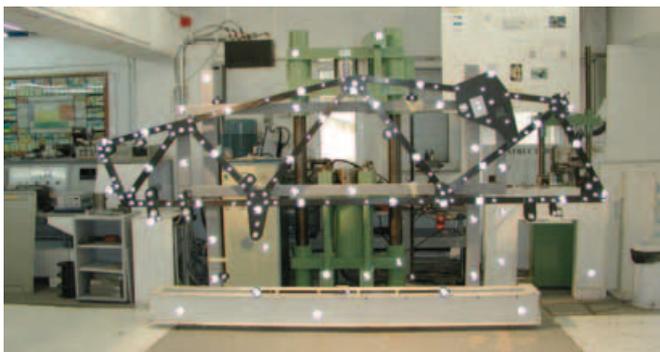


Figure 16. Banc de validation d'un MAB en usine (Grèce).

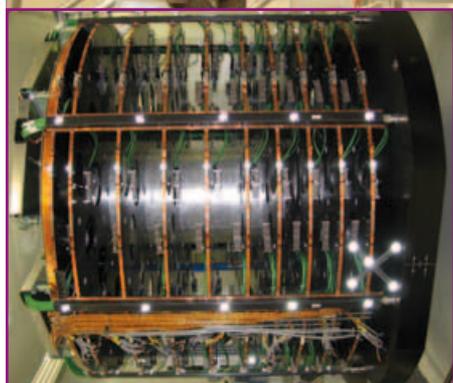
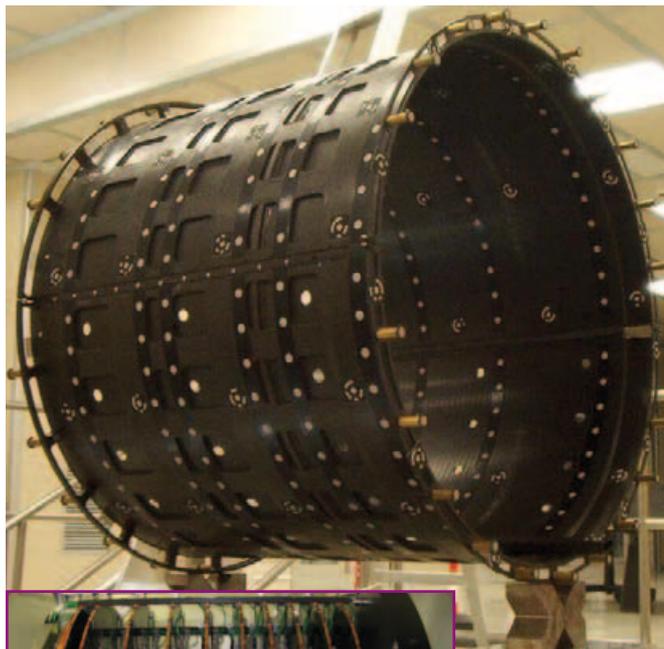


Figure 17. Calibration optique d'un MAB et installation dans une roue YB.

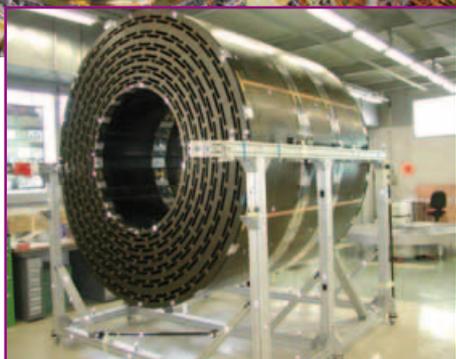
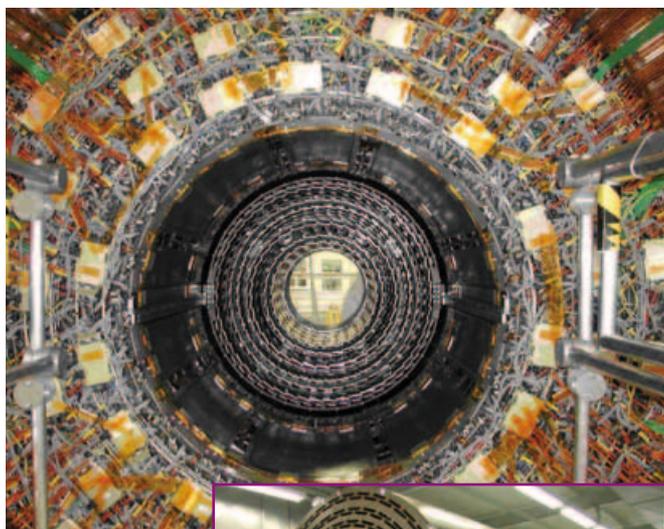


chaque roue ayant servi à son positionnement dans le référentiel général de la machine, fournit toutes les positions spatiales des chambres et des éléments du système interne d'alignement dans le référentiel général de la machine. Le fichier obtenu constitue la base de données géométriques attendue par les physiciens. L'incertitude en écart-type des mesures de validation et calibration est donnée chacune à  $20\ \mu\text{m}$ , celle de positions à  $100\ \mu\text{m}$ , respectant le budget total d'erreur total de  $200\ \mu\text{m}$  en écart-type. On estime à près de 40 000 photos l'opération "détecteurs muons barrel" – voir figures 16 et 17.

Les 13 composants du détecteur central (TK), cylindre de 7 m de long et 2.5 m de diamètre et dont la "précision interne" est prévue à  $20\ \mu\text{m}$ , se décomposent en demi-barrels et demi-end-caps gauches-droites, chacun se présentant suivant 3 couches (interne, intermédiaire et extérieure) s'emboîtant les unes les autres. Le volume et le nombre des services imposés par l'électronique de fonctionnement et de contrôle ont rendu les validations des enveloppes primordiales tant au stade des prototypes que des objets "tels que construits". Chaque composant, sous-couche et enveloppe comprise, une fois validé individuellement, est inséré et repose dans le cylindre container via un système unique de 2 rails, est rattaché par photogrammétrie (D2X et 3DSTUDIO-Aicon) relativement à des marques fiducielles extérieures du cylindre ménagées près des dispositifs de réglage de l'ensemble. Chaque sous-couche demi-barrel et demi-end-cap a ses propres paramètres géométriques de positionnement dans le cylindre principal, les incertitudes relatives



**Figure 18.**  
Enveloppe  
prototype barrel TK  
(Pise) et validation  
structure TK (Aix-la-  
Chapelle).



**Figure 19.**  
Métrologie du  
cylindre final  
après validation  
d'une structure  
en sous-couches  
(CERN).

## ■ En savoir plus sur le hadron et l'électron-volt

### Le hadron

Un hadron est un élément composite non homogène de particules subatomiques, les quarks et/ou les antiquarks, régi par l'interaction forte, caractérisée elle par la présence de gluons qui sont "les vecteurs porteurs de cette force". On ne compte que 6 quarks et 6 antiquarks fondamentaux qui sont donc les "briques" constitutives de la matière. Un "vecteur" ou "boson" n'est pas une particule mais l'agent d'une force : s'il n'y a pas de "vecteur", aucune "force" ne peut s'exprimer, autrement dit, rien ne se passe! Les gluons sont les responsables de la cohésion des quarks, les "bosons"  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$ , découverts au CERN il y a plus de 20 ans, sont les agents de la force électrofaible, alliant la force électromagnétique dont le boson est le photon et la radioactivité : les explosions solaires sont les exemples types de manifestation de la force électrofaible.

Pour aider à la compréhension, osons une comparaison : au cours d'un match de football, le boson c'est le ballon : pas de ballon, quoi faire des 11 joueurs d'un côté et des 11 autres de l'autre ? Les hadrons sont aussi appelés particules lourdes puisque constitués d'au moins deux quarks (quark et/ou anti-quark), par comparaison aux leptons dites particules légères car elles sont des éléments uniques de matière et donc dépourvus de quarks. Le hadron le plus célèbre est le proton (renfermant 3 quarks) et on dénombre plusieurs centaines de hadrons, le lepton le plus célèbre est l'électron et on ne compte que 6 "vraies" particules leptons fondamentaux, associés à leur antiparticule, soit donc 12 également. Les quarks et les leptons sont donc en fait les "vraies" particules élémentaires puisque tous les hadrons sont une association de quarks et antiquarks. Cette similitude (appelée SUSY, super-symetry en anglais) – 12 "quarks" et 12 "leptons" – même si confortable à ce jour ne "suffit" pas tout à fait, le boson responsable de la masse reste à découvrir et les grandes questions quant à certains comportements de la matière sont toujours à l'ordre du jour.

### L'électron-volt : symbole eV

**1 TeV =  $10^{12}$  eV.** L'électron-volt est défini comme étant l'unité d'énergie d'un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel de 1 volt. Un électron-volt est égal à environ  $1,602 176 53 \times 10^{-19}$  joule. Aussi utilisé en physique relativiste pour donner la masse des particules. Le proton "pèse" environ 2 GeV. Le "boson" de Higgs serait de l'ordre de 130 à 150 GeV.

**Rappel :** le "poids" de l'électron est égal à  $9,11 \times 10^{-31}$  kg soit donc pas de grands dangers à 14 TeV ...

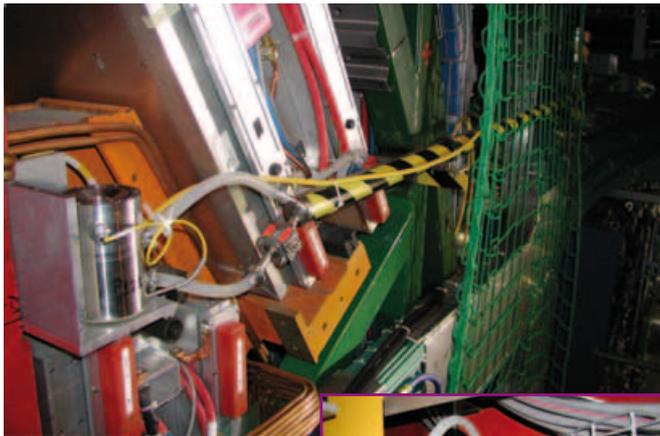
#### Vocabulaire :

**Boson :** provient du nom du physicien Satyendranath Bose et introduit en physique relativiste par Paul Dirac

**Quark :** provient d'une phrase du roman *Finnegans Wake* de James Joyce et introduit en physique des particules par Gell-Mann qui en a formulé le premier la théorie avant les découvertes et confirmation expérimentales.

étant estimées à 100  $\mu$ m en écart-type et c'est l'axe moyen calculé qui est retenu pour le positionnement du TK dans le référentiel général de la machine, à 0.5 mm en écart-type . Grâce à des préparations méticuleuses et des conditions de laboratoire, les métrologies individuelles ont été réalisées à des incertitudes de 20  $\mu$ m en écart-type : ces opérations ayant eu lieu à différents endroits non équipés de machines à coordonnées, la photogrammétrie s'est révélée le seul moyen sans contact adapté





**Figure 20.** Capteur HLS YB0, liaison vers le réseau principal – capteur HLS dans un pied du YB0 et liaisons vers les 2 autres capteurs des pieds.



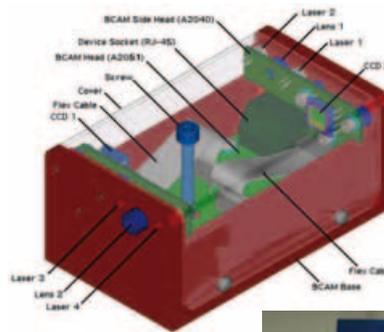
vu la fragilité de certains éléments, leurs forme, dimension et configuration – voir figures 18 et 19.

La métrologie de positionnement des détecteurs a été complétée par des systèmes extérieurs spécifiques de surveillance, insensibles au champ magnétique principal, cause de déformations possibles et le groupe a la supervision et la maintenance des instrumentations correspondantes.

Le suivi vertical est un ensemble de 4 capteurs capacitifs bien connus HLS (*Hydrostatic Leveling System*) disposés dans la roue YB0 qui contient les détecteurs centraux TK et les MABS de référence, le suivi radial est assuré par 3 lignes disposées le long des YBs et YE une fois fermées et inspectées à partir de caméras BCAM (*Brandeis Camera Angle Monitor*).

Le système HLS (résolution donnée à 1  $\mu\text{m}$ ) comprend 1 capteur sur une face du YB0, relié directement au réseau principal, machine liant les 2 derniers éléments magnétiques de l'accélérateur situés à 45 m de part et d'autre et fixant le plan de référence, l'altitude du YB0 et son contenu étant ainsi directement surveillés suivant une incertitude de 10  $\mu\text{m}$  en écart-type. Il comprend aussi 3 capteurs installés dans les pieds du YB0 reliés entre eux et disposés tels que les inclinaisons longitudinale et radiale puissent être suivies avec une incertitude de quelques  $\mu\text{mrad}$ s – voir figure 20.

Le système BCAM, moins connu, est basé sur l'utilisation simultanée de 2 caméras se visant réciproquement, chacune comportant 2 ou 4 diodes flash (BCAM double) perçues par leur optique à focale courte et capteur vidéo respectifs. Les distances entre les spots sont corrélées à tout déplacement et rotation relatifs avec une incertitude interne de 5  $\mu\text{mrad}$ . Chaque caméra est centrée sur un support isostatique point-trait-plan, équipé pour des cibles rétro-réfléchissantes et la photogrammétrie a permis de valider dans une incertitude globale radiale et hauteur de 30  $\mu\text{m}$  en écart-type, incluant l'optique et la mécanique du système complet, les calibrations BCAM-BCAM et BCAM-coin de cube, celui-ci réfléchissant les spots émergents. La photogrammétrie a aussi permis de rat-



**Figure 21.** Schéma d'une BCAM, support et trous de référence.



**Figure 22.** Couloir avec BCAMs et fiducialisation dans le référentiel d'une roue YB.

tacher les ensembles supports-BCAMs-coins de cubes dans un référentiel objet donné. Les 3 couloirs, 2 latéraux et 1 supérieur, ont été aménagés sur 25 m de longueur pour recevoir plusieurs ensembles, le grand champ d'ouverture de 40 mrad permettant de disposer plusieurs caméras dans un même couloir, les fréquences des flashes pouvant être modulées, réalisant ainsi un contrôle optique permanent d'alignement multipoint. Des comparaisons lors des tests de fermeture des YBs et des YEs entre des données BCAM et survey traditionnel ont montré pour les 3 couloirs des différences radiales et hauteurs toutes inférieures à 0.3 mm – voir figures 21 et 22.

Enfin et en complément du traitement standard des mesures périodiques des déformations, les configurations, surabondances et robustesses se dégradant depuis la mesure 0, les insertions de détecteurs et fermetures rendant indisponibles nombre d'accès et de visibilité, une approche prospective est actuellement testée. Celle-ci est basée sur le filtre de Kalman en considérant l'objet comme un système cinématique avec vitesse et accélération et en tenant compte de la fiabilité d'origine. Elle permet d'analyser au mieux les résultats successifs malgré le manque de mesures, et aussi de prédire les futures positions et estimations d'erreurs.

## Conclusion et références

La mesure précise et contrôlée d'objets de grandes dimensions par photogrammétrie numérique est une activité de base bien maîtrisée par le groupe au CERN. En complément des techniques de scanning, faisant aussi partie de notre

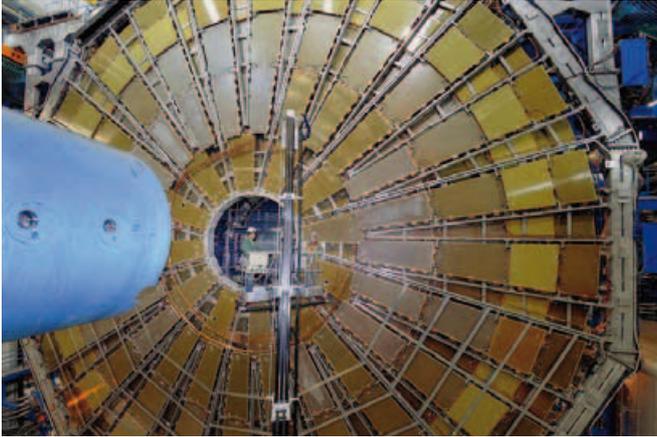


Figure 23. Roue muon Atlas - 25 m diamètre.

“boîte à outils”, la photogrammétrie telle qu’appliquée pour CMS, grâce à sa portabilité, sa rapidité d’exécution et d’analyse en rapport au grand nombre de points pouvant être traités en une même opération quasi “on-line” avec l’équipement D2X/WLAN et 3DSTUDIO-Aicon, et son adaptabilité au milieu en fait l’instrument idéal pour de nombreuses autres applications, soit en complément soit en substitution avantageuse des techniques théodolites et laser trackers.

Elle a été amplement utilisée à tous les stades des validations, contrôles et positionnements des supports et détecteurs des autres expériences LHC, chaque opération ayant ses propres spécificités. On estime ainsi à 40 000 le nombre total des prises de vues effectuées sur Atlas ce qui, vu les conditions d’accès et d’environnement, mérite aussi d’être qualifié de “grande première” – voir figure 23.

Certaines configurations d’utilisation ont pu être testées comme la synchronisation (production G.M.S) de prises de vues jusqu’à 5 caméras pour des mesures dynamiques à des fréquences compatibles – voir figure 24.

Les facilités de 3DSTUDIO de reconnaissance de contour n’ont pu être testées par manque de temps et d’application comme la modélisation rapide d’objets, particulièrement celle de l’enveloppe des détecteurs, la détermination de coordonnées ayant été privilégiée.

Le système mis en place, après validations et formations sur place, s’est aussi “déplacé” vers d’autres projets et lieux de la physique fondamentale ou appliquée (Expérience OPERA au Gran Sasso – Italie, projet Tokamak NCX Princeton – USA).



Figure 24. Synchronisation de 3 caméras DCS 620 (interface électronique G.M.S).

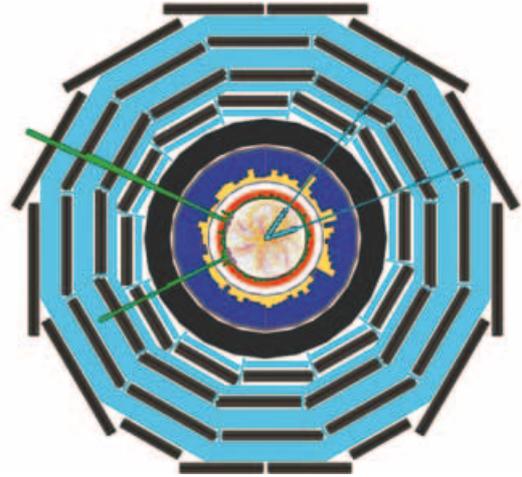


Figure 25. Simulation d’un événement caractéristique du boson de Higgs – émission de 2 électrons et 2 muons.

CMS va bientôt enregistrer les premières collisions proton-proton et “nos” coordonnées approchées de positionnement relatif des détecteurs, sont à la base des analyses et reconstructions plus précises et plus fines des trajectoires caractéristiques du boson de Higgs, chaînon manquant responsable de la masse, et vont donc contribuer à la découverte – voir figure 25.

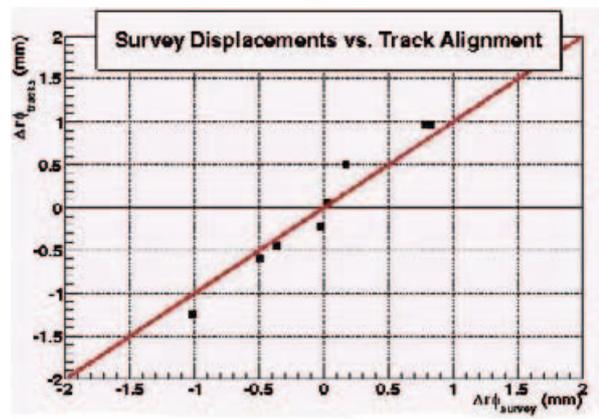
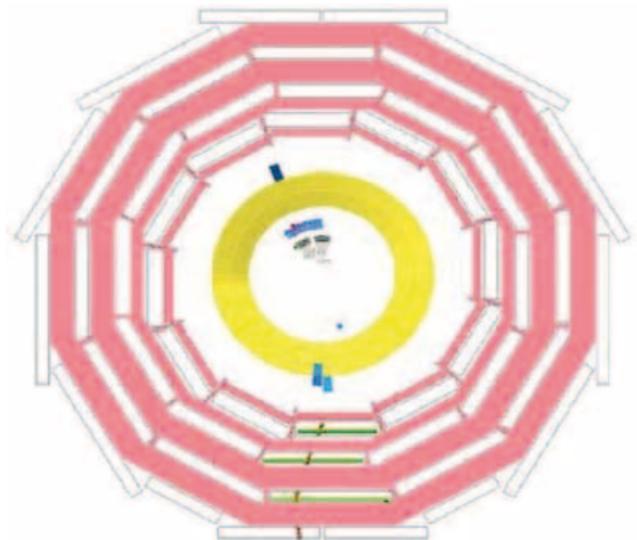


Figure 26. Rayons cosmiques dans les détecteurs muons et corrélation avec la géométrie.

► En fait, les physiciens analystes ont déjà testé les algorithmes de reconstruction en utilisant les traces des rayons cosmiques traversant les couches de détecteurs de l'expérience et en exploitant nos données de positionnement et celles vues par les systèmes internes. La corrélation "géométrie-alignement des traces" pour les chambres à muons barrel s'est révélée être à mieux que 50 µm en écart-type, belle preuve indépendante et irréfutable de la qualité de la métrologie d'ensemble – voir figure 26. Enfin, le sujet a fait l'objet de nombreux travaux de fin d'année d'études d'écoles et universités, la liste complète à ce jour suit, et de présentations à divers séminaires internationaux dont il est donné quelques titres. ●

## Contacts

**Jean-Frederic FUCHS** (CERN-CMS)  
jean-frederic.fuchs@edf.fr

**Raphaël GOUDARD** (CERN-CMS)  
Raphael.Goudard@cern.ch

**Christian LASSEUR** (CERN-TS-SU)  
Christian.Lasseur@cern.ch

**Jean-David MAILLEFAUD** (CERN-PH)  
Jean-David.Maillefaud@cern.ch

**Aurélie MAURISSET** (CERN-CMS)  
Aurelie.Maurisset@cern.ch

## Références

**Clarisse WANTZ** (ENSAIS) - Octobre 1998  
*Analyse des performances du logiciel de photogrammétrie numérique Rolleimetric/CDW et son application aux installations du CERN*

**Katja NUMMIARO** (Helsinki University of Technology) - December 1998 - *Master's thesis: Geometrical Validation of the CMS Magnet by Close-range Photogrammetry*

**Jean-Frédéric FUCHS** (ENSAIS) - Juin 1999 - *Mesure des objets industriels de grandes dimensions par photogrammétrie numérique. Performances et analyse du système caméra DCS 460 - logiciel Rollei/CDW*

**Marc DAEFFLER** (ENSAIS) - Octobre 2001  
*Etude de stabilité des caméras Kodak DCS-460 et DCS-660 utilisées au CERN en métrologie de positionnement des détecteurs*

**Sandrine THIRIET** (ESGT) - Juillet 2001  
*Etudes des performances d'un système de photogrammétrie digitale - Application à la construction d'un grand détecteur de particules CMS*

**Henning KVAERNO** (Norwegian University of Science and Technology) - 2004 - *Master thesis: Evaluation of digital compact cameras for use in close-range photogrammetry*

**Solveig FISKAA** (Norwegian University of Science and Technology) - 2008 - *Evaluation of non-retro-reflective targets in digital close-range photogrammetry*

**Angelika LIPPITSCH** (PhD Thesis - Engineering Geodesy - TU Graz) - 2006 - *A Deformation Analysis Method for the Metrological Atlas Cavern Network at CERN Kinematic and Adaptive Adjustment Techniques.*

**Aurélie MAURISSET** (ESGT) - 2007 - *Système électro-optique de mesures métrologiques des grandes structures. Etude des performances et des applications de la caméra digitale BCAM*

**Friedrich LACKNER** (PhD Thesis- TU Vienne) - 2007  
*Design and High Precision Monitoring of Detector Structures at CERN*

## Autres références

**Antje BEHRENS** (IWAA - CERN Genève) - 2004 - *New Developments in Close Range Photogrammetry Applied to Large Physics Detectors*

**Antje BEHRENS** (Large Volume Metrology Conference - Liverpool) - 2007 - *Three Dimensional Metrology Techniques Applied to Large Particle Accelerators and Detectors at CERN*

**Dirk MERGELKUHLE** (DGPF - Jahrestagung Konstanz) - 2001  
*Der Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie beim Aufbau des CMS-Detektors am CERN*

**Christian LASSEUR** (CMSC Dearborn et FIG Paris) - 2000 et 2003  
*Digital Photogrammetry Applied to Large Physics Detectors*

## Remerciements

Les auteurs associent tous leurs plus proches collègues, personnel permanent CERN, boursiers et "project associates" à cette belle aventure professionnelle qui n'aurait pas pu être rapportée ici sans leur contribution. Enfin, ils ne peuvent clore sans adresser leurs remerciements aux chefs de projet et ingénieurs CMS qui ont très vite compris l'intérêt de la photogrammétrie et qui leur ont fait confiance en leur attribuant des moyens exceptionnels en personnel et matériel.

Ils se doivent d'en citer quelques-uns : A. Hervé, H. Gerwig, G. Faber, D. Campi, M. Lebeau, A. Ball, P. Petiot, L. Veillet, M. Alidra, T.Rodrigo, G. Benze., A. Garonna, J. Bos, J.P Girod, sans oublier les autres.

## ABSTRACT

**Key words:** metrology, digital photogrammetry, large scale metrology

*CERN, near Geneva, is one of the world's largest and most respected centers for scientific research. Its business is fundamental physics, finding out what the Universe is made of and how it works. The world's largest and most complex scientific instruments are used to study the basic constituents of matter – the fundamental particles. By studying what happens when these particles collide, physicists learn about the laws of Nature. The LHC is the current great project which, with an accelerator proton-proton of 27 km of circumference, comprises 4 great experiments. One among them, CMS, is a general-purpose detector to explore a large range of fields of physics. The Group "SU", Large Scale Metrology, is responsible for the precise positioning of the elements of the accelerators and of the detectors and the maintenance of alignments according to the needs functions, also including the metrology of quality control of any component before its installation when the traditional workshop methods are inadequate.*

*The article presents the implementations and the results obtained of the techniques of industrial geodesy and photogrammetry applied to the metrology of positioning of the constituent elements of the experiment CMS.*

# Positionnement de puits déviés

Implémentation des corrections à envisager lors de la représentation des trajectoires de puits déviés en projection cartographique  
Propositions et analyses de trois méthodologies possibles.

■ Antoine BILLAULT

■ MOTS-CLÉS

Puits dévié, corrections géodésiques, projection cartographique, données trajectoire-puits.

*La généralisation des puits déviés à très long départ (Extended Reach Drilling) incite les services Forage & Géomatique du groupe pétrolier TOTAL à remettre en question l'état actuel*

*du positionnement géodésique d'une trajectoire de puits, et sa représentation sur une projection cartographique. La conception avant forage d'un puits dénote qu'une trajectoire est référencée dans un système local (topocentrique). Notre étude montre que les tentatives de conversion en coordonnées planes, sur ces coordonnées intermédiaires, opérées par les sociétés spécialistes en mesures de puits déviés, se révèlent être erronées. Consécutivement, l'intégrité des données de trajectoire s'en trouve significativement altérée. Trois solutions sont ainsi présentées et détaillées, dont deux pourraient être la base de l'implémentation d'un module de conversion, inédit, géoréférençant correctement les données d'une trajectoire-puits.*

## Contexte de l'étude

Dans une société en pleine mutation sur les questions de gestion de l'énergie et de l'exploitation durable des ressources naturelles, une compagnie pétrolière multinationale, telle que le groupe TOTAL, se doit de relever perpétuellement des défis humains et techniques dans l'exploration et la production des énergies fossiles, ressources avérées épuisables. Pour répondre à ces challenges ambitieux, les architectures des trajectoires de puits deviennent de plus en plus complexes, et leurs départs horizontaux atteignent désormais une dizaine de kilomètres pour les puits dits ERD (Extended Reach Drilling). Le positionnement de ces trajectoires dans une représentation cartographique compréhensible et interprétable a posteriori, par les différents services impliqués dans ce dernier (Forage, Géophysique, Réservoir), impose une présence, un suivi et un contrôle de l'entité habilitée en tant que tel, à savoir le service Géomatique.

L'état actuel des données de positionnement des trajectoires-puits mérite d'être examiné, et les calculs, formules et corrections géodésiques adoptés, aussi bien par le service

Forage, lors de la conception des puits, que par les sociétés de services qui fournissent des mesures de trajectoire de puits déviés, en cours de forage, requièrent une investigation approfondie.

Les approximations constatées, les incohérences révélées feront l'objet d'une mise en garde quant à l'exploitation des données des trajectoires-puits, et des solutions pour les géoréférencer correctement dans le système géodésique en vigueur sur la zone d'étude seront explicitées.

## État de l'art du positionnement des puits déviés

La première étape consiste en la mesure de points stationnés le long de la trajectoire, modélisée lors du design ou établie en temps réel lors du forage effectif. Sur un site de forage, ce mesurage est accompli par des entrepreneurs spécialistes, et fournit in fine les observations brutes suivantes : le couplet (Azimut Magnétique, Inclinaison locale) de la BHA (Bottom Hole Assembly ou garniture de forage) avec un instrument MWD (Measurement While Drilling), ou bien le couplet (Azimut Géographique, Inclinaison locale) de la BHA avec une centrale inertielle, auquel on adjoint une troisième donnée : la longueur physique forée (longueur des tiges empilées).

Par la suite, l'emploi d'un algorithme d'interpolation de ces observations discrètes permet de retracer le parcours du train de tiges le long du puits conçu ou foré. Bien que la méthode du minimum de courbure (minimum curvature), entre deux points stationnés, demeure le standard proclamé et adopté

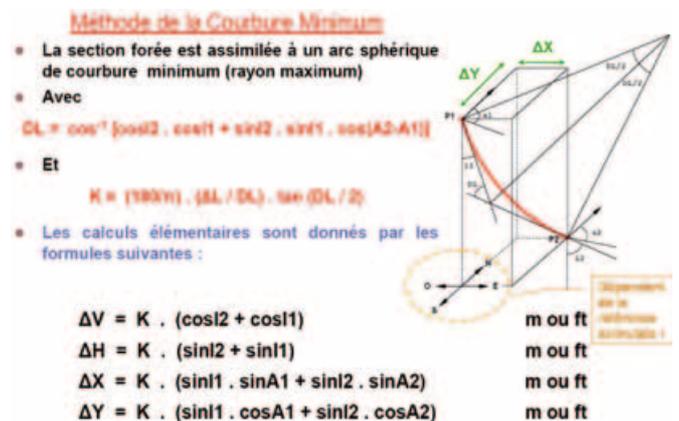


Figure 1. Principe et référentiel mathématique de la méthode de la courbure minimum dans le calcul d'une trajectoire-puits.



à ce jour, la méthode du "constant Tool Face", entreprise exclusivement lors de la conception de la trajectoire-puits, facilite l'exécution du forage parce qu'elle se fonde sur le seul algorithme existant capable de reproduire fidèlement le principe de fonctionnement naturel des outils de forage dirigé (gradients de changement de courbure et d'inclinaison constant, gradient de changement d'azimut variable). Indépendamment de cette distinction, ces deux principes raisonnent dans un environnement en trois dimensions, c'est-à-dire un trièdre orthonormé.

Ainsi, les coordonnées intermédiaires, résultantes de ce traitement d'observations pseudo-brutes, définissent un point quelconque de la trajectoire sous la forme d'un déport physique ( $\Delta X, \Delta Y$ ) où l'origine est la première mesure réalisée en tête de puits, accompagné d'une profondeur (*True Vertical Depth*), assimilable à l'opposé d'une altitude, et où l'origine est ici aussi la tête de puits. Du reste, ces coordonnées sont référencées selon les axes du trièdre relatif à l'algorithme d'interpolation retenu. Une mauvaise habitude peut être prise d'appliquer aux données brutes Azimutales une valeur constante de déclinaison magnétique (pour des observations acquises avec un MWD) et de convergence des méridiens, déterminées en tête de puits, afin d'orienter, à tort, ces Azimuts sur un nord cartographique, et exprimer après coup des déports connotés comme des déplacements Est-Ouest & Nord-Sud de la trajectoire par rapport à la plate-forme de forage (Rig). Une première faute est ici commise par négligence d'un paramètre géodésique (variation dans l'espace de la convergence des méridiens due à la projection cartographique).

Alors que le service Forage réceptionne les coordonnées de la cible (*target*) – déterminées par le service Réservoir – sous la forme (*Easting, Northing*) +TVD qui se réfèrent respectivement à un système géodésique et un référentiel altimétrique – soit

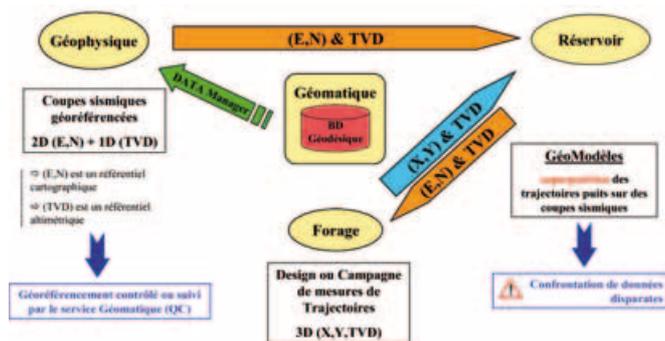


Figure 2. Nature des données échangées entre les différentes entités impliquées dans un projet d'Exploration & Production.

dans un univers 2D + 1D –, les foreurs confrontent cette donnée avec leurs valeurs intermédiaires ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta TVD$ ), pourtant définies dans un univers 3D, où l'origine de ce triplet de coordonnées, commune en chaque point représentatif de la trajectoire, est la tête de puits. La figure ci-dessous résume la nature des données de positionnement des trajectoires-puits véhiculées entre les acteurs d'un projet d'Exploration & Production, au sein du groupe TOTAL.

Aux erreurs précédemment introduites viennent s'ajouter d'autres approximations mises en évidence dans les rapports des campagnes de mesures réalisées par les prestataires de services (de mesures de déviations), lesquels rapports sont ensuite transmis aux foreurs. Ces rapports affichent les observations pseudo-brutes – puisqu'on ne dispose pas des valeurs originelles d'Azimuts (magnétique ou géographique selon l'instrument de mesure) – soit une donnée déjà faussement convertie, où l'unique valeur de convergence retenue est affichée dans l'en-tête d'un rapport. Les coordonnées intermédiaires sont aussi répertoriées comme des déplacements Nord-Sud et Est-Ouest. Enfin, les coordonnées de chaque point de la trajectoire sont formulées dans la projection cartographique en usage sur la zone du forage, par l'emploi des relations suivantes :

$$Northing(i) = Northing(Rig) + \Delta NS_{Rig}^i \cdot SF_{Rig}$$

$$Easting(i) = Easting(Rig) + \Delta EW_{Rig}^i \cdot SF_{Rig}$$

Figure 3. Formule adoptée dans un rapport de campagne de mesures pour exprimer la position d'un puits en coordonnées cartographiques.

Ce calcul élémentaire retient une valeur fixe de module linéaire (*Scale Factor*), déterminée en tête de puits ( $SF_{Rig}$ ), laquelle, multipliée par le déport selon le pseudo-Nord ou le pseudo-Est d'un point issu de son calcul d'interpolation, puis additionnée de la coordonnée initiale (tête de puits) Nord ou Est, produira respectivement la coordonnée plane Nord ou Est de ce point. La figure présentée ci-après schématise, sur un extrait d'un rapport d'une campagne de mesures, ce calcul approximatif.

## Développements et perspectives d'évolution

Trois solutions ont été étudiées pour répondre aux besoins du service Forage, à savoir leur permettre de concevoir et représenter avant forage des trajectoires géoréférencées, et

Comments	Measured Depth (m)	Inclination (deg)	Azimuth (deg)	TVD (m)	Vertical Section (m)	NS (m)	EW (m)	DLS (deg/30 m)	Northing (m)	Easting (m)	Latitude	Longitude	Sub-Sea TVD (m)
Tie-In	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9416732.48	784121.04	S 5 16 19.391	E 11 33 47.542	-29.60
Sea bed	199.60	0.00	0.00	199.60	0.00	0.00	0.00	0.00	9416732.48	784121.04	S 5 16 19.391	E 11 33 47.542	170.00
GWD	224.10	0.81	85.62	224.10	-0.12	0.01	0.17	0.99	9416732.49	784121.21	S 5 16 19.391	E 11 33 47.547	194.50
GWD	253.52	0.11	165.56	253.52	-0.26	0.00	0.39	0.81	9416732.48	784121.43	S 5 16 19.391	E 11 33 47.554	223.92
GWD	273.02	0.64	295.62	273.02	-0.22	0.03	0.29	1.10	9416732.51	784121.33	S 5 16 19.390	E 11 33 47.551	243.42
GWD	287.21	0.54	248.96	287.21	-0.14	0.04	0.10	1.91	9416732.52	784121.20	S 5 16 19.390	E 11 33 47.547	257.61

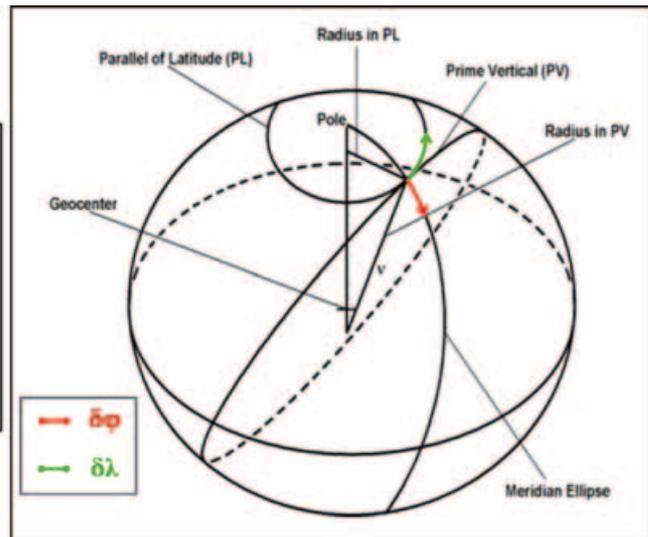
x (SF)

Figure 4. Valeurs disponibles pour chaque mesure, dans un rapport d'une campagne de mesures (données Forage, [2007], confidentiel)

$$\delta\varphi_i^{i+1(rad)} = \frac{\Delta Y_i^{i+1}}{(\rho_i - TVD_i)}$$

$$\delta\lambda_i^{i+1(rad)} = \frac{\Delta X_i^{i+1}}{(\nu_i - TVD_i) \cdot \cos\varphi_i}$$

Figure 5. Fondements géodésiques sur lesquels repose la méthode LMP (ZINN, [2005], modifié).



recommander aux prestataires de services de revoir leurs formules de conversion et d'expression de la trajectoire en projection.

- La première solution est présentée dans la publication SPE n° 96813<sup>(1)</sup>. Cette méthode est tirée d'un raisonnement formulé par David M. Lee (ExxonMobil®), d'où son nom LMP pour *Lee's Modified Proposal*. Elle est géodésiquement juste dans son raisonnement, et permet de s'affranchir des corrections de convergence de méridiens (passage Azimut Géographique ⇔ Azimut Cartographique) et de module linéaire. Elle nécessite des coordonnées intermédiaires déterminées à partir d'Azimut Géographique et fournit, au final, des coordonnées géographiques. La figure ci-dessus résume le principe et les formules générales.

Avec :

$\rho$  : rayon de courbure de l'ellipse méridienne ou section normale au point  $i$ , en mètre.

$\nu$  : rayon de courbure de la section normale perpendiculaire ou grande normale au point  $i$ , en mètre.

On opère donc par calculs itératifs, et la connaissance de  $\rho$  et  $\nu$  au point  $i$ , dans la détermination des variations en latitude et longitude entre les points  $i$  et  $i+1$ , répond à l'application de leur définition respective.

Elle répond à un artifice de calculs géodésiques recevables si certaines hypothèses sont remplies :

- les variations  $\Delta X$  et  $\Delta Y$  doivent être définies à partir d'Azimuts Géographiques, et non Cartographiques ou considérés comme tels.
- ces formulations sont correctes tant que les variations  $\Delta X$  et  $\Delta Y$  restent infiniment petites devant les valeurs de  $\rho$  et  $\nu$  (ratio  $< 10^{-5}$  rad # 1" d'arc), et que le calcul est réalisé entre deux points consécutifs, successivement.
- la correction dite de "passage de la corde à l'arc" est insignifiante pour des variations  $\Delta X$  et  $\Delta Y$  de quelques décimètres sur l'ellipsoïde géodésique.
- les variations de latitude et de longitude, à l'issue du calcul, sont exprimées en radians.

- La deuxième solution consiste en la transformation d'un repère topocentrique (là où sont définies les coordonnées

intermédiaires, c'est-à-dire dans le référentiel de travail des foreurs, à savoir en 3D) vers le repère géocentrique du datum en vigueur. Cette méthode est très lourde à mettre en œuvre car elle exige une bonne maîtrise des fondamentaux géodésiques, et introduit beaucoup d'étapes et calculs préalables dans la préparation des données (équation de Laplace, transformation d'Helmert...).

- La troisième solution repose dans un simple calcul par point lancé. On se base sur des coordonnées intermédiaires déterminées à partir d'Azimuts géographiques, entre autres. Entre deux points consécutifs, on détermine la valeur de la convergence des méridiens ( $\gamma$ ) et l'altération linéaire local ( $m$ ), tous deux propres à la projection dans laquelle on souhaite exprimer les coordonnées finales, et après réduction, sur l'ellipsoïde, de la distance euclidienne entre ces deux points, on applique les formules usuelles du point lancé.

$$E_{i+1} = E_i + m_i \cdot D_{i(ell)}^{i+1} \cdot \sin G_i^{i+1}$$

$$N_{i+1} = N_i + m_i \cdot D_{i(ell)}^{i+1} \cdot \cos G_i^{i+1}$$

Où :

$E_i, N_i$  : coordonnées cartographiques du point  $i$ , en mètre,

$m_i$  : altération linéaire au point  $i$ , fonction de la projection et de la position du point, sans unité,

$G_i^{i+1}$  : gisement entre le point  $i$  et  $i+1$ , en degré, et  $G_i^{i+1} = Az_{i(geo)}^{i+1} \pm \gamma_i$ .

$D_{(ell)}$  : distance réduite sur l'ellipsoïde, en mètre.

Le développement des première et troisième solutions a été réalisé sous Matlab R2006a, celui de la deuxième, en raison de sa complexité, a été achevé avec un tableur Excel. En outre, certains modules géodésiques complémentaires, internes au service Géomatique, ont été requis : pour le calcul d'une ondulation du Géoïde, on a utilisé le module développé par Rémi FELTEN ([2005], PFE @ TOTAL) qui se base sur le modèle de géoïde GGM02C ; pour la conversion des coordonnées géocentriques et/ou géographiques en coordonnées cartographiques, on a utilisé le module GCU® (interne à TOTAL).



Les résultats produits par ces trois solutions sont homogènes au mètre près, et ceux issus des solutions LMP (solution I) et Point Lancé (solution III) présentent des écarts inférieurs à 5 cm sur un puits au départ excédant 10 km. Ces deux dernières solutions résultent de calculs directs et rapides provenant d'implémentations sommaires.

De surcroît, le service Forage établit, en chaque point mesuré d'une trajectoire, un ellipsoïde d'incertitude sur son positionnement, à partir d'un modèle d'erreurs<sup>(2)</sup> standardisé qui tient compte des méthodologies suivies lors de la mise en œuvre de la mesure ainsi que des performances des instruments de mesures. Assurément, le défaut de correction géodésique, ou encore la non-conversion, en coordonnées planes, des coordonnées intermédiaires des foreurs, agissent comme une propagation d'erreurs systématiques, en chaque point observé et mesuré, et altèrent sérieusement la qualité de ces données en augmentant significativement le volume de l'ellipsoïde d'incertitude, du moins sa projection dans un plan horizontal.

L'intégration des bonnes corrections géodésiques proposées ci-dessus pour la conversion dans un référentiel cartographique des données-puits du service Forage (Design & trajectoires mesurées), lesquelles sont opposables a posteriori avec les données des services Géophysique et Réservoir, relève d'un commun accord entre les services Géomatique et Forage. Le service Forage entreprend de développer une future Base de Données dédiée aux trajectoires puits (avec les incertitudes sur les positions associées) ; en conséquence, les orientations relatives au développement et à l'intégration de ces corrections doivent être arrêtées très prochainement.

## Récents progrès

Depuis l'aboutissement de ce projet de fin d'étude, un logiciel complet destiné à répondre aux attentes des pétroliers sur ces questions de contrôles des données de trajectoire-puits est apparu sur le marché. Il semble que ses performances et résultats annoncés correspondent aux besoins du service Forage en matière de Contrôle Qualité (QC) des données de trajectoire-puits échangées. Ce produit complet devrait permettre de juger de la validité des données puits acquises et diffusées par un prestataire de mesures conformément aux spécifications du cahier des charges. Selon un communiqué de la société développant cet outil, ce progiciel offre la possibilité à l'utilisateur de contrôler les données d'un puit avant son import dans les multiples plates-formes SGBD et/ou logiciels de géophysique, et s'assurer de la présence des paramètres géodésiques et de leur définition conforme aux conventions usuelles (Sont-ils renseignés ?). Précisément, cet outil recalcule le *Scale Factor* (altération linéaire) et la convergence des méridiens – relatifs à la projection cartographique de l'étude – sur l'ensemble de la trajectoire, soulignant ainsi les variations de ces paramètres caractéristiques et prépondérants pour une exploitation fiable de la trajectoire-puits, son archivage et sa pérennité.

## Synthèse

Cette étude avait pour objectif premier d'éclaircir les manipulations opérées sur les données de positionnement des trajectoires de puits, puis d'inspecter, plus particulièrement, le

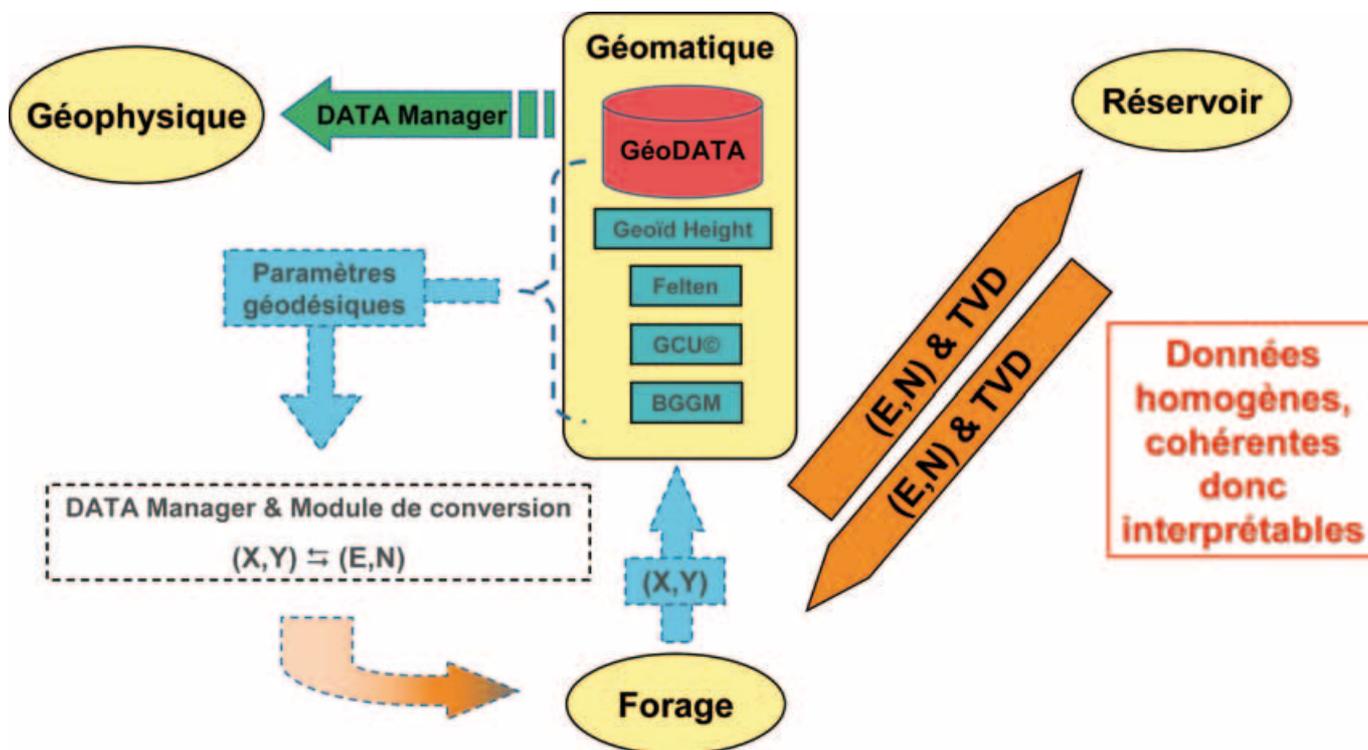


Figure 6. Schéma synthétique sur l'intégration du module de conversion géoréférençant les trajectoires-puits. Prototype suivant les orientations pressenties au service Forage.

► niveau d'intégration des notions et corrections géodésiques fondamentales à l'expression d'une trajectoire d'un puits dévié dans une projection cartographique, format de données compréhensible et homogène pour tous les acteurs intervenant dans un projet d'Exploration & Production.

Des imperfections notoires ont été décelées, aussi bien en interne au service Forage, lors d'une conception d'un puits par leur logiciel-métier, que dans un rapport d'une campagne de mesures relevées et transmises par un prestataire de services spécialiste en mesurage de puits dévié.

Des solutions claires, détaillées et approfondies ont été développées, et garantissent le géoréférencement approprié d'une trajectoire-puits dans le système géodésique en vigueur sur la zone d'étude. Deux solutions peuvent être retenues dans la perspective de l'implémentation vraisemblable et prochaine d'un module destiné à convertir une trajectoire-puits en coordonnées cartographiques. Reste à statuer sur les orientations à venir au service Forage quant à l'élaboration d'une Base de Données officielle et dédiée aux données puits, pour que le service Géomatique puisse livrer l'application géodésique *ad hoc*.

Parallèlement, le S&P (*Surveying & Positioning Committee*), du consortium OGP (*International Oil & Gas Producers*), qui gère la base de données géodésiques internationale EPSG<sup>(3)</sup> (issu de l'ancien *European Petroleum Survey Group*) – instance suprême en matière de Géodésie dans le monde du pétrole – aurait tout intérêt à dresser une liste de recommandations sur les formules, algorithmes, paramètres, chiffres significatifs, relatifs à la gestion des systèmes géodésiques et cartographiques susceptibles d'être intégrés ou pris en charge par les logiciels-métiers en usage dans une compagnie pétrolière et ses filiales, tel que TOTAL. Cette certification valoriserait à la fois l'autorité de l'OGP S&P, les performances et la fiabilité des logiciels audités et avérés conformes aux normes édictées, et surtout la qualité et l'intégrité des données puits. Dernièrement est apparu sur le marché un progiciel analysant et contrôlant la valeur des métadonnées géodésiques des données de trajectoire-puits. Cette solution, *ad hoc* en cela qu'elle répond à notre problématique, mérite d'être testée sur des échantillons de puits ERD. Manifestement, la recherche d'une architecture complexe d'un puits foré sur un déport horizontal de plusieurs kilomètres caractérise les nouveaux défis des foreurs, et ceux-ci se doivent d'en garantir une utilisation viable au moyen d'une documentation exhaustive des paramètres descriptifs du système géodésique de la zone d'étude, mais aussi en fournissant un géoréférencement correct de la trajectoire-puits conforme à la projection cartographique associée en vigueur. ●

## Contacts

**Antoine BILLAULT**  
antoinebillault@msn.com

**Bernard FLACELIERE**  
Responsable topographie du service Géomatique, TOTAL

## Glossaire

**BHA** : garniture de forage, constituée de l'outil de forage (trépan), de stabilisateurs, des sondes (logs) de mesures directionnelles et géologiques, et de tiges amagnétiques.

**Constant Tool Face** : en trajectographie pétrolière, méthode reposant sur l'asservissement du Dog Leg Severity DLS #  $\frac{\text{rayon de courbure}}{\text{distance}}$  et de l'inclinaison à des valeurs constantes et sur la seule variation de l'azimut de la BHA. Il en résulte un tool face constant.

**MWD** : Sonde de mesures de trajectoire-puits composée d'un trièdre orthogonal (XYZ) d'accéléromètres (trois, soit un capteur aligné sur chaque axe), et d'un trièdre orthogonal de magnétomètres.

**Puits ERD (*Extended Reach Drilling*)** : puits à grand déport horizontal et/ou vertical.

**Rig** : derrick sur une plate-forme de forage.

**Scale Factor ou Point Scale Factor (SF) (couramment nommé Scale Factor ou Grid Scale Factor)** : module linéaire ou module de réduction à la projection cartographique, propre à la projection associée au Datum en usage sur le site de forage.

**Target** : localisation du gisement d'hydrocarbure, spécifiée par le service Réservoir sous la forme d'un jeu de coordonnées (Easting, Northing, TVD).

**True Vertical Depth (TVD)** : profondeur ramenée à la verticale locale (assimilable à l'opposée de l'altitude).

## Bibliographie

- (1) ZINN, N.D. [2005], *Accounting for Earth Curvature in Directional Drilling*, SPE paper n° 96813.
- (2) EKSETH, R., [1998], *Uncertainties in connection with the determination of wellbore positions*, Doctoral thesis 1998, Norwegian University of Science and Technology, 1998:24 IPT-rapport. ISBN: 82-471-0218-8.
- (3) URL : <http://www.ogp.org.uk/> et <http://info.ogp.org.uk/geodesy/>

## ABSTRACT

**Key words:** deviated well, geodetic corrections, cartographic projection, well-trajectory data.

*Trivialization of ERD wells has prompted the Drilling & Geomatic departments of the group TOTAL to thoroughly investigate the current state of geodetically positioning a wellbore trajectory, and subsequently its representation on a cartographic projection. It was noticed that a designed trajectory is referenced from the wellhead, where coordinates which depict that wells are equivalent to local displacements given from that unique and fixed point. Furthermore, contractors who are specialists in the measurement of deviated wells endeavour to provide cartographic coordinates of a surveyed wellbore, but they do so wrongly because of many oversights regarding geodetic notions and phenomena. Consequently, that lack of rigor when processing trajectory data dramatically alters their interpretation due to an increase of the ellipse of uncertainty on a point position which draws the trajectory. Thus, three solutions are detailed, and two of them should be put aside and be required for a further implementation of a module devoted to an accurate georeferencing of well-trajectory data.*

## Relevé lasergrammétrique et traitement des nuages de points de moulages de la Gypsothèque de l'Université Marc Bloch de Strasbourg

■ Cyril CALLEGARO

La collection des moulages de l'Université Marc Bloch est contemporaine de la création de la Kaiser-Wilhelm-Universität fondée en 1872. Elle est née de la volonté de réunir en un même lieu un musée imaginaire, une collection idéale de sculptures grecques. A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, cette collection est une des plus brillantes d'Europe. Entreposée dans les sous-sols du Palais Universitaire depuis 1945, la collection a subi de nombreuses dégradations. La gypsothèque de l'Université Marc Bloch cherchait un moyen de pouvoir réaliser des représentations des statues et d'élaborer éventuellement des modèles en trois dimensions. De tout temps, l'approche la plus utilisée pour représenter des statues est le dessin. Le procédé reste manuel et suppose du temps de réalisation très important. De plus la subjectivité du dessinateur est souvent trop présente.

Dans ce contexte, le laboratoire MAP-PAGE, a proposé à la gypsothèque de l'Université Marc Bloch, la numérisation en trois dimensions de certaines pièces de ses collections pour réaliser, à long terme, un musée virtuel accessible à tous par Internet. Cependant, l'immense variété de statues présentes dans la gypsothèque rend impossible l'utilisation de différentes techniques de numérisation. En effet, plusieurs méthodes utilisées de façon complémentaire sont envisageables mais rendent la numérisation réellement onéreuse telles la combinaison d'un lever tachéométrique et photogrammétrique, l'utilisation simultanée d'un scanner laser pour les formes générales, de la photogrammétrie rapprochée pour les détails et les capteurs à projection de lumière structurée ou codée. Il est donc nécessaire de sélectionner un bon équipement et la méthodologie requise afin d'obtenir un bon compromis entre la qualité du résultat et le coût global de l'opération. Un des objectifs du projet est la numérisation dans son ensemble d'une statue (Figure 1) en utilisant une seule méthode, un seul type d'équipement et des logiciels standardisés.



Figure 1. Amazone de type "Mattéi", statue présente à la gypsothèque.

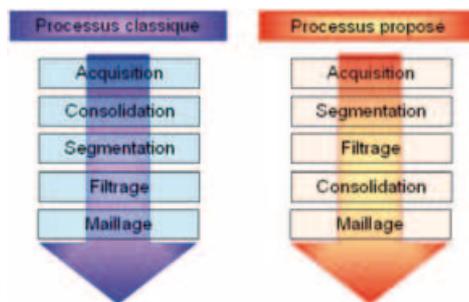


Figure 2. Processus classique et processus proposé.



Figure 3 : de gauche à droite, maillage brut du nuage de points brut, maillage brut du nuage de points filtré, modèle final (pour le buste Faro).

Une procédure de réduction du bruit sur la mesure a été mise en place en s'inscrivant dans une méthode spécifique de modélisation, qui présente l'originalité de filtrer les données avant de procéder à la consolidation des divers nuages de points (cf. Figure 2). De plus, ce projet a permis de tester, en plus du scanner Trimble du MAP-PAGE, le scanner laser Faro LS à mesure de différence de phase. Du point de vue qualitatif, le modèle Faro apparaît le plus représentatif de la statue originale. Du point de vue quantitatif et à défaut de mesures de contrôle sur la statue – la méthode de relevé classique d'une statue reste manuelle et fastidieuse et d'un modèle numérique de référence il n'a pas été possible d'établir une comparaison. Cependant, en considérant chaque modèle indépendamment l'un de l'autre, on observe que nombre de points du nuage issu des données Faro sont plus proches du modèle associé.

Des modèles 3D ont été produits en n'utilisant qu'un seul type de technologie et des logiciels standardisés. Les résultats sont encourageants au vu du bruit auquel les nuages de points sont soumis (cf. Figure 3). L'amélioration du processus est donc envisagée. Les scanners utilisés ne semblent pas adaptés à de la mesure à courte distance, et les conditions d'utilisation doivent être améliorées. La statue qui a servi aux expérimentations est extrêmement complexe tout en étant de couleur très sombre, ce qui nuit à la réflexion du signal laser. La procédure de filtrage peut être améliorée en optimisant la construction des "Range Images", et en modifiant le type de filtre utilisé. Le filtre adaptatif "Wiener" proposé par Matlab a été utilisé, mais les nouveaux filtres à base d'ondelettes fournissent aussi des résultats intéressants. De plus, le programme employé mériterait d'être compilé sous un langage plus performant (C ou C++) que celui de Matlab qui génère des temps de calcul importants. En revanche, le logiciel 3DReshaper, développé par l'entreprise Technodigit, a été très performant pour la modélisation des zones complexes. Un système de scanner laser à repérage de position semble beaucoup plus adapté pour ce type de travaux. Ainsi, le travail effectué lors de ce projet permet au laboratoire MAP-PAGE d'ouvrir de nouvelles perspectives dans la modélisation architecturale et la conservation du patrimoine. ●

## Redressement et mosaïquage : mise en place d'une chaîne de production et nouveau procédé

■ Clément BROSSARD

La représentation du monde réel à travers un univers virtuel devient un besoin de plus en plus grand aussi bien dans la vie de tous les jours (ventes sur Internet, publicités) que dans les divertissements (jeux vidéo, films) et les domaines culturels et scientifiques (muséographie, conservation de sites archéologiques). Pour obtenir des modèles 3D, il est possible de les créer de toutes pièces grâce à des logiciels d'infographie (Blender, 3DS Max, Cinéma 4D). Cependant, le monde scientifique s'attache à représenter les vrais objets ou sites par le biais de techniques telles que la lasergrammétrie ou la photogrammétrie rapprochée. Les méthodes utilisées, qu'il s'agisse d'infographie ou de reconstruction du modèle à partir d'un objet réel, sont en général coûteuses en temps et en espace de stockage.

L'avènement des nouvelles technologies de l'informatique avec des possibilités toujours plus grandes de stockage des données et une vitesse accrue de traitement de ces données, contribue à l'essor scientifique de la modélisation 3D des objets. Au sein de la communauté scientifique, les archéologues se tournent irrémédiablement vers ces nouveaux outils de conservation et de diffusion pour présenter leurs découvertes au plus grand nombre. Afin de modéliser sites archéologiques et patrimoine historique, les scientifiques doivent continuellement développer de nouvelles méthodes pour répondre aux demandes toujours plus précises et conséquentes. De nombreuses techniques de modélisations sont développées. Elles facilitent la modélisation mono-image, la modélisation multi-images, le redressement d'images, et la réalisation d'orthophotographies. Le projet étudié met uniquement en œuvre la méthode de redressement d'image pour modéliser l'environnement. L'étude a été réalisée en Espagne au sein de l'entreprise Global Mediterranea, entreprise qui possède un groupe de travail spécialisé dans la modélisation 2D et 3D à partir de photographies (cf. Figure 1 et Figure 2. Exemples de sols à redresser). L'objectif du projet porte sur l'amélioration du rendement des techniques utilisées tout en gardant une qualité optimale des rendus.

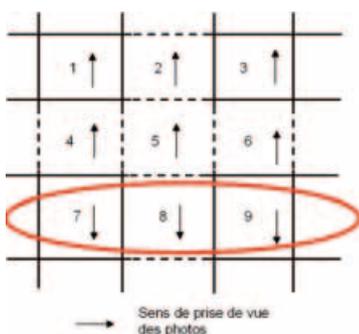


Figure 1. Squelette sur le site d'Oropesa (Espagne)

Dans un premier temps, l'étude s'est attachée à mettre en évidence les divers points faibles des méthodes existantes, et plus particulièrement des méthodes utilisées par Global. Elle a permis d'aboutir à une nouvelle approche du redressement d'image en pensant le redressement non plus dans un environnement en

2D, mais dans l'environnement 3D VRML. Cette méthode s'applique aussi bien au redressement d'images isolées qu'à celui d'une mosaïque de photos.

La deuxième partie du projet a permis de mettre en forme le programme de redressement des images. Cette solution encadre l'ensemble de la chaîne de production, de la prise des photos sur le terrain jusqu'à la réalisation et visualisation de la mosaïque d'images redressées.

Ce programme est structuré autour d'un ensemble d'étapes, passages obligés, permettant d'obtenir les orthophotos finales. Le principe d'obtention des images redressées s'appuie sur les propriétés propres au langage VRML pour le plaquage des textures. L'idée générale est de recréer dans un environnement 3D la surface sur laquelle on souhaite redresser l'image, et de mapper ensuite la texture sur cette surface afin de la faire coïncider avec sa surface réelle (cf. figure 3).

Au final, cette méthode de redressement d'images et de création de modèles 3D d'objets composés de surfaces planes diminue grandement le temps de traitement des données par rapport au logiciel utilisé jusqu'à présent par l'entreprise. De plus une étude comparative entre la nouvelle méthode développée et les méthodes utilisées jusqu'à présent par l'entreprise montre des écarts inférieurs à 2 mm, ce qui reste négligeable.

Une étape supplémentaire dans la modélisation passe par la recherche d'automatisation quels que soient le type de modèles 3D traité et le rendu final de cette modélisation. Cette amélioration devrait passer par l'utilisation d'un filtre de détection de contour afin de recouper autrement la surface redressée. L'utilisation de tels découpages modifierait singulièrement la forme de la surface redressée et nécessiterait de se poser de nouvelles questions sur le découpage de la surface pour le mappage de la texture. ●



Figure 2. Mosaïque d'une pièce du palais d'Alaquas (Espagne).

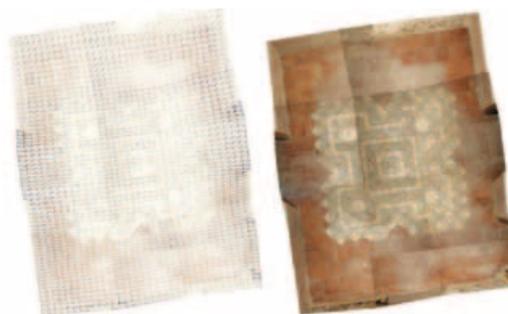


Figure 3. Mosaïque après redressement de l'ensemble des images, maillage et texture.

## Etude relative aux méthodes de mise en œuvre et à la précision du scanner laser RIEGL LMS Z420i dans le cadre des travaux topographiques d'EDF

■ Carine HONORÉ

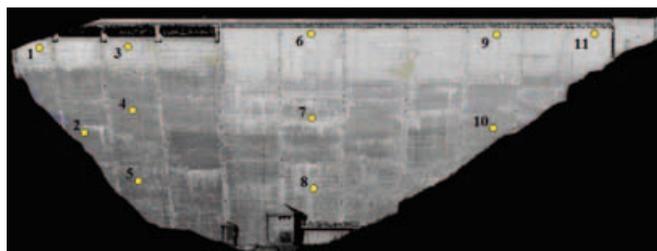
Les grands ouvrages de génie civil du parc de production de EDF font l'objet d'une surveillance accrue. L'une des missions du service "topographie" concerne l'auscultation des ouvrages pour déterminer leur état d'endommagement (apparition de défauts géométriques, déformations...) afin d'anticiper leur évolution dans le temps. Pour améliorer la qualité des prestations, le service « topographie » s'est doté d'une technologie d'acquisition récente : un scanner laser de longue portée : le RIEGL LMS Z420i. Le projet vise à déterminer les conditions d'utilisation, à considérer les paramètres et erreurs, le degré de précision et d'exactitude envisageable avec le scanner laser RIEGL LMS Z420i pour les travaux topographiques de EDF, et particulièrement dans le cadre du suivi des tours de réfrigérant et des barrages hydrauliques.

De manière générale, l'étude s'inscrit dans une logique de recherche et développement. En effet, le service "topographie" a une grande expérience de la mesure d'auscultation, mais il se doit d'améliorer chaque jour ses procédés de suivi, et cela passe par une remise en question permanente de ses outils. Ce projet souligne donc la volonté d'innovation, d'adaptation et de recherche d'EDF.

La comparaison des méthodes, des précisions et des documents réalisables, a permis d'analyser les avantages et inconvénients du remplacement de la photogrammétrie par la lasergrammétrie. Ainsi les déformations détectables par les lasers scanners sur les tours ont pu être quantifiées. La précision correspondante doit être rapportée à l'échantillon de mesures utilisé. Si la photogrammétrie permet d'atteindre

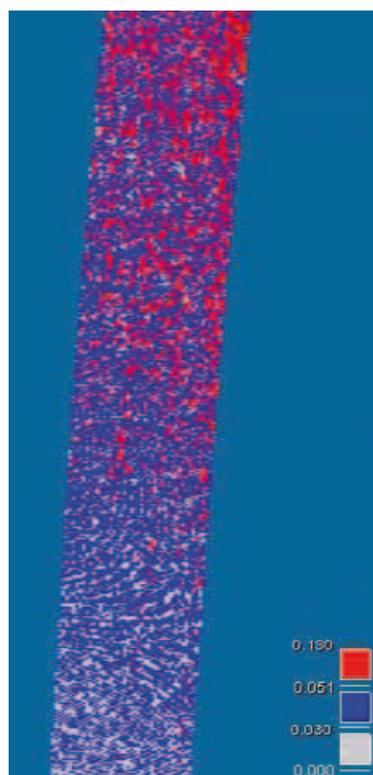


Une tour de réfrigérant.



Orthophoto du barrage des Gloriettes avec positionnement des cocardes

une précision supérieure, il ne faut pas négliger l'importante densité d'informations apportée par la technique lasergrammétrique, ni d'ailleurs l'intérêt économique de l'entreprise. Concernant l'auscultation des barrages le couplage des auscultations de déformation et des défauts est une réelle avancée. L'utilisation du capteur laser est parfaitement adaptée à ce type d'ouvrage. Cependant, l'emploi du levé topographique sera toujours de rigueur pour connaître avec exactitude l'amplitude et le sens des mouvements. En conclusion, la lasergrammétrie se pratique comme un excellent complément dans le suivi actuel des ouvrages d'EDF. ●



Nuage coloré en fonction des écarts entre scans sur une zone de recouvrement.

# Téledétection et cartographie : des outils au service de la thermographie aérienne

■ **Matthieu LEFEBVRE**

## ■ MOTS-CLÉS

Economie d'énergie, déperditions thermiques, thermographie aérienne, cartographie.

*Dans le cadre des engagements de la France pour la réduction de ses dépenses énergétiques, le chauffage des bâtiments représente un fort potentiel en raison des déperditions thermiques importantes dont il est la cause. La thermographie aérienne se propose alors d'être un outil adapté au diagnostic énergétique global d'ensembles de bâtiments à l'échelle d'une ville, d'un département ou d'une région. Elle s'appuie sur les lois physiques de la thermodynamique pour mesurer à distance les températures de surface. L'analyse menée sur ces températures a pour objectif d'extraire des indicateurs permettant de connaître le niveau de déperdition thermique des bâtiments. Cette information doit néanmoins faire l'objet d'une diffusion large et adaptée à travers différents canaux pour sensibiliser les habitants concernés à la consommation énergétique de leur logement et les conseiller le cas échéant sur les moyens d'amélioration de la performance thermique par des travaux d'isolation.*

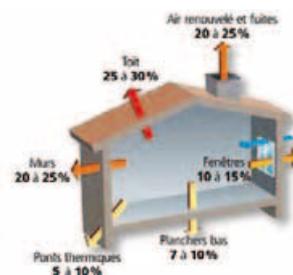
Ces dernières années, les problématiques environnementales se sont imposées jusqu'à être aujourd'hui au cœur des préoccupations politiques, techniques et individuelles. Un des enjeux portés notamment lors du Grenelle de l'Environnement d'octobre 2007, concerne la lutte contre les changements climatiques et la maîtrise des dépenses énergétiques [1]. La France s'est ainsi engagée à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 2000 et 2050 [2].

Parmi les secteurs concernés par les émissions GES, celui du bâtiment est particulièrement présent. En 2005 il était responsable d'environ 23,7% des émissions toutes consommations confondues (chauffage, climatisation, eau chaude, etc.), la part essentielle étant due au chauffage [3]. En conséquence un des leviers d'action pour la réduction des GES passe par la maîtrise de la consommation d'énergie et l'utilisation des énergies renouvelables pour le chauffage des bâtiments. La France s'est ainsi prononcée en faveur de l'établis-

sement obligatoire d'un diagnostic de performance énergétique lors de toute transaction immobilière qu'elle soit locative ou bien acquisitive, afin de sensibiliser les habitants à la consommation énergétique de leur logement [4]. Ce diagnostic se fait néanmoins au cas par cas, bâtiment par bâtiment, et ne permet donc pas d'analyser rapidement la performance énergétique globale de parcs bâtis complets. Outre ces mesures de sensibilisation, l'Etat a également mis en place des incitations financières et fiscales pour encourager les propriétaires à engager des travaux d'isolation de leurs bâtiments. Les propriétaires peuvent ainsi bénéficier de crédits d'impôt, d'un taux de TVA réduite, de subventions ou encore d'éco-prêts auprès des banques lors de ces travaux. L'intérêt est alors double : il permet d'une part d'apporter une solution au problème des émissions GES, et d'autre part de générer des économies à l'échelle de la collectivité et de l'habitant.

La thermographie aérienne est une des réponses à l'analyse globale de la per-

formance énergétique d'ensembles de bâtiments à l'échelle d'une ville, d'une agglomération ou d'un département. Elle permet d'établir une vue comparative des déperditions thermiques de tous les bâtiments observés. La pertinence technique de cette méthode repose sur des études faites par l'Ademe [5] démontrant que 25% à 30% des déperditions thermiques totales d'un bâtiment passent par sa toiture.



**Figure 1.** Illustration des déperditions thermiques d'une maison individuelle non isolée.

A défaut de donner un bilan énergétique complet et exhaustif de chaque bâtiment – les façades, autre source importante de déperdition, sont délaissées dans ce type d'étude – l'analyse des déperditions thermiques des toitures est néanmoins un bon indicateur des besoins en isolation des habitations. Ces études ne sont pourtant efficaces que si elles sont associées à une campagne de communication conséquente autour des résultats produits. Ce type de projet comporte donc généralement un double volet : technique d'abord, afin de cartographier les températures en surface et détecter par là les constructions énergivores, informatif ensuite en publiant via la presse, les salons locaux (habitat, développement durable, etc.), sites web ou autres les résultats de l'étude pour sensibiliser les habitants à la consommation énergétique de leur logement et les conseiller le cas échéant sur les moyens d'en améliorer la performance thermique par des travaux d'isolation.

Avant de détailler ces deux volets de la thermographie aérienne, il paraît utile d'exposer dans un premier temps les bases physiques sur lesquelles cette technique repose.

## Bases théoriques fondamentales de la thermographie

Il existe plusieurs types d'échange de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Ce dernier est connu depuis l'antiquité. C'est par exemple le rayonnement des parois d'un four porté à haute température qui assure la cuisson du pain. Le fait que les parois du four changent de couleur en fonction de sa température intérieure est une observation ancienne. C'est durant la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, après avoir fini par admettre la réalité de la structure atomique de la matière, que les physiciens ont cherché à comprendre les lois de la physique qui gouvernent le rayonnement thermique. En 1859, Kirchhoff établit ainsi l'universalité du rayonnement thermique en prouvant que la lumière émise est indépendante de la nature, de la forme ou encore de la taille de l'objet concerné. En sus du phénomène d'émission, les physiciens observent et établissent qu'un objet réagit au rayonnement incident en absorbant une partie de l'énergie reçue, en réfléchissant une autre partie ou en transmettant une dernière. De ce principe physique fondamental est dérivée la loi de conservation de l'énergie, qui lie les coefficients d'absorption  $\alpha$ , de réflexion  $\rho$  et de transmission  $\tau$ .

### Loi de conservation de l'énergie

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \text{ [Sans unité]}$$

Ces coefficients expriment le rapport entre l'énergie respectivement absorbée, réfléchi, transmise et l'énergie incidente à l'objet. Pour aborder l'étude du rayonnement thermique, les physiciens ont alors défini un corps théorique dit "corps noir", c'est-à-dire un corps opaque ( $\tau = 0$ ), non réfléchissant ( $\rho = 0$ ) et donc absorbant tout rayonnement incident ( $\alpha = 1$ ). Un corps noir est aussi par définition un corps à l'équilibre thermodynamique qui réémet sous forme d'ondes électromagnétiques toute l'énergie qu'il reçoit.

C'est en étudiant les propriétés radiatives du corps noir que Planck établit à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle la loi de distribution spectrale de l'énergie émise pour une température donnée. Cette loi bouleversa le monde de la physique en cela qu'elle valida de façon complètement inattendue mais néanmoins parfaite les premières bases de la mécanique quantique. Elle unifiait en un seul modèle les précédents travaux de Rayleigh-Jeans définis pour les basses fréquences, et ceux de Wien valables aux fréquences très élevées tout en s'accordant parfaitement avec les mesures expérimentales. Elle est aujourd'hui à la base des mesures de température par rayonnement.

### Loi de Planck

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Exitance énergétique [ $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ]

$\lambda$  = Longueur d'onde [m]

T = Température absolue [K]

h = Constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$ ) [J.s]

c = Vitesse de la lumière ( $2,998 \cdot 10^8$ ) [m.s<sup>-1</sup>]

k = Constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$ ) [J.K<sup>-1</sup>]

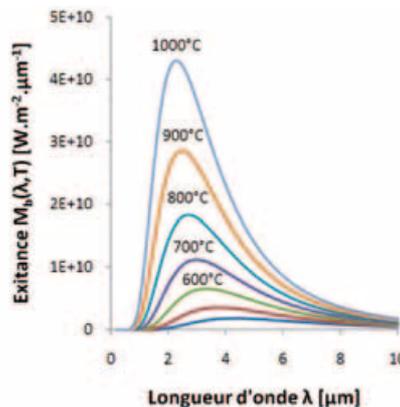


Figure 2. Loi de distribution spectrale de l'énergie émise par un corps noir pour une température donnée.

Par suite, Wien dérivait la loi de Planck pour obtenir sa loi de déplacement qui permet d'identifier la longueur d'onde correspondant au maximum de rayonnement d'un corps noir en fonction de sa température, formalisant ainsi les connaissances empiriques anciennes liant la température d'un corps et sa couleur.

### Loi de Wien

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}$$

Longueur d'onde correspondant au maximum d'émission du corps noir pour une température donnée [ $\mu m$ ]

Finalement, l'intégration de l'équation de Planck sur l'ensemble du spectre permet de dégager la loi de Stephan-Boltzmann qui exprime l'énergie totale émise par un corps noir en fonction de sa température.

### Loi de Stephan-Boltzmann

$$M_b(T) = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4$$

Exitance énergétique du corps noir [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$\sigma$  = Constante de Stephan-Boltzmann ( $5,670 \cdot 10^{-8}$ ) [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ]

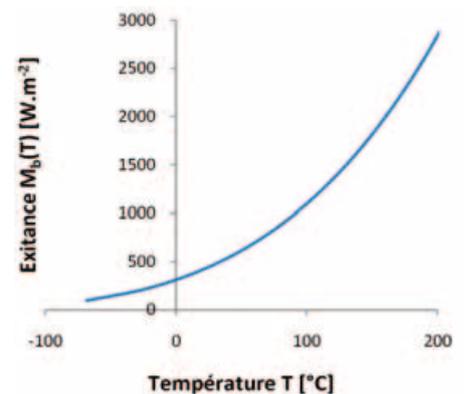


Figure 3. Loi de Stephan-Boltzmann de l'énergie émise en fonction de la température du corps noir.

Toutes ces lois sont établies en s'appuyant sur les propriétés d'un corps noir théorique défini précédemment. Elles ne s'appliquent donc pas en l'état aux objets de notre environnement qui ne seraient pas assimilables à des corps vraiment noirs, c'est-à-dire parfaitement absorbants pour tous les rayonnements reçus.

Les propriétés radiatives de ces objets sont néanmoins décrites par référence avec un corps noir parfait. On définit ainsi l'émissivité d'un objet, qui est le rapport entre l'énergie émise par cet objet et l'énergie émise par un corps noir porté à la même température.



## ■ Définition de l'émissivité

$$\varepsilon = \frac{M(T)}{M_b(T)}$$

Emissivité d'un objet [Sans unité]

$M(T)$  : Exitance énergétique émise par l'objet à une température  $T$  [ $W.m^{-2}$ ]

$M_b(T)$  : Exitance énergétique émise par un corps noir pour une même température  $T$  [ $W.m^{-2}$ ]

L'énergie émise par un objet quelconque est donc toujours inférieure à celle émise par un corps noir porté à la même température. On en déduit par conséquent que ce rapport varie entre 0 et 1 en fonction des objets, l'émissivité du corps noir étant par définition égale à 1. Les objets caractérisés par une émissivité inférieure à 1 sont appelés des "corps gris". La loi de Stephan-Boltzmann peut par ce biais être étendue à tous les objets.

## ■ Loi de Stephan-Boltzmann étendue

$$M(\varepsilon, T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Exitance énergétique émise par l'objet [ $W.m^{-2}$ ]

$\varepsilon$  = Emissivité de l'objet [Sans unité]

La mesure de l'énergie émise par un objet, pourvu qu'elle soit associée à la connaissance de son émissivité, permet par conséquent d'en déterminer sa température en surface. C'est ce principe qu'exploite la thermographie pour mesurer à distance les températures. Il reste toutefois limitée par l'absence de connaissance réelle de l'émissivité exacte de chaque objet. Néanmoins la mesure des températures apparentes s'avère être un excellent outil de travail pour appuyer la recherche des fuites thermiques.

## Acquisition des données

Les mesures thermographiques sont acquises par voie aéroportée au moyen d'une caméra observant dans le domaine du moyen infrarouge thermique. Cette bande de longueurs d'ondes allant de 3 à 5  $\mu m$ , a en effet la propriété de représenter le maximum d'émission d'un corps noir porté aux alentours de la température ambiante, tout en bénéficiant d'une excellente propagation dans l'atmosphère, avec une atténuation très réduite.

L'acquisition doit se faire dans des condi-

tions météorologiques bien spécifiques. La température extérieure doit être minimale, typiquement inférieure à 5°C, afin d'observer au mieux la température des bâtiments liée aux systèmes de chauffage. L'eau évaporable à la surface des objets doit également être aussi réduite que possible, et donc il ne doit pas y avoir eu de précipitations dans les 36 heures précédant l'acquisition des mesures. Le vent, qui accélère beaucoup les échanges par convection, doit être nul ou très faible. Enfin, il importe d'éviter la lumière du soleil dont l'absorption par les matériaux de surface influence les mesures en entraînant le réchauffement naturel des objets observés. Toutes ces contraintes réunies ne permettent pas de disposer de nombreuses fenêtres d'acquisition des mesures. Celles-ci se font ainsi l'hiver, de nuit, en début de matinée (entre 6 h et 9 h) ou en fin de soirée (entre 20 h et 23 h), afin d'acquérir les mesures lors des mises en chauffe des habitations. De manière rigoureuse, la fenêtre entre 6 h et 9 h doit être privilégiée afin d'éviter le phénomène d'inertie thermique susceptible d'intervenir le soir suite à l'accumulation de la chaleur dans les matériaux en journée.

D'un point de vue technique, la cartographie des températures sur de grandes surfaces nécessite d'adapter les techniques classiques d'acquisition et de traitement photogrammétriques aux contraintes imposées d'une part par le domaine spectrale observé, le moyen infrarouge thermique, et d'autre part par le capteur employé, la géométrie de ce dernier étant identique aux caméras couramment utilisées en photogram-

Superficie	390 km <sup>2</sup>
Focale	50 mm
Hauteur de vol	600 m
Taille de l'image au sol	192 x 154 m <sup>2</sup>
Résolution spatiale	30 cm
Nombre de bandes	182
Longueur de vol	3 100 km
Nombre d'images	22 600
Temps de vol	35 heures
Durée d'acquisition	12 jours

Figure 4. Quelques chiffres détaillant les paramètres de vol pour la thermographie de l'Agglomération de Rouen.

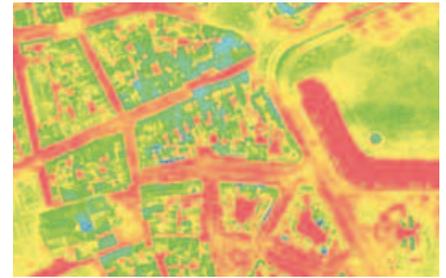


Figure 5. Orthothermoplan en pseudocouleur selon une échelle linéaire continue de température allant de -2,7°C (bleu) à +6,1°C (rouge).

métrie. Aussi, bien que proposant la plus grande matrice disponible sur le marché, la caméra thermique utilisée n'excède pas les 640 x 512 pixels en taille ! La résolution spatiale importante, généralement spécifiée entre 30 et 50 centimètres dans ce type de projet, impose par conséquent de multiplier les images en vue de couvrir de manière exhaustive le territoire concerné. Quelques chiffres sont donnés ici à titre d'exemple pour illustrer les quantités importantes qui peuvent être engagées au moment de l'acquisition des mesures.

Les nombreuses images acquises sont autant de paramètres d'orientation externe à résoudre en vue de corriger la géométrie des images pour les assembler. La résolution de ces orientations se fait au moyen d'une aérotriangulation qui s'appuie sur les données trajectographiques acquises durant le vol pour disposer de valeurs approchées robustes en entrée du système. Ces valeurs approchées sont d'autant plus importantes que l'information thermique présente dans un seul canal de l'image ne facilite pas la tâche des corrélateurs pour la recherche automatique des points de liaison. Au final, les images sont orthorectifiées et mosaïquées pour constituer ce que nous avons baptisé un "orthothermoplan" par analogie avec l'orthophotoplan établi dans le domaine visible.

## Correction radiométrique

Le traitement des données acquises passe ensuite par la conversion des mesures issues de la caméra en grandeurs physiques exploitables. Le modèle de calibration utilisé pour cela



est de type linéaire, caractérisé par deux paramètres, un gain et un offset. Ces paramètres font l'objet d'une détermination préalable en laboratoire par les biais d'observations réalisées sur un corps noir étalon, dont la température connue permet d'en établir l'énergie théoriquement émise. La comparaison de l'énergie théorique calculée et des valeurs effectives mesurées par la caméra donne lieu à un problème classique d'optimisation résolu par moindres carrés, et dont est issu le modèle de calibration. Les mesures généralement codées en 24 bits sur le canal unique des caméras thermiques, sont ainsi transformées en valeurs d'exittance énergétique  $[W.m^{-2}]$  par l'intermédiaire de ce modèle.

Outre le problème classique de calibration spectrale du capteur, la question centrale est celle de l'interprétation physique de la mesure elle-même. L'énergie mesurée est par principe celle qui est parvenue jusqu'au capteur thermique. Il s'agit donc d'une mesure qui inclut des contributions extérieures ici considérées comme parasites, et qu'il convient de modéliser correctement pour les éliminer, afin d'isoler le terme qui nous intéresse. Pour cela, on considère que l'énergie captée résulte d'une somme de contributions issues de l'objet ( $C_o$ ), de l'atmosphère ( $C_a$ ) et de l'environnement ( $C_e$ ).

### ■ Contributions à l'éclairage du capteur

$$M_t = C_o + C_a + C_e$$

*Exittance énergétique totale mesurée par la caméra  $[W.m^{-2}]$*

Parmi ces contributions, celle de l'atmosphère ne peut pas être complètement négligée, car elle absorbe une partie de l'énergie incidente provenant de l'objet, tandis que les particules qui la composent en diffusent une autre partie qui est renvoyée dans toutes les directions. Cette atténuation atmosphérique, qui dépend fortement de la longueur d'onde du rayonnement concerné, est ici assez faible, bénéficiant d'une fenêtre de propagation atmosphérique. Cette dernière justifie par conséquent là aussi le choix du moyen infrarouge thermique situé entre 3 et 5 microns comme domaine

observé par le capteur. Cette atténuation n'y est toutefois que limitée et non totalement éliminée. Il faut donc en tenir compte dans le modèle destiné à corriger les mesures. Le terme de contribution de l'objet prend par conséquent la forme suivante.

### ■ Contribution de l'objet

$$C_o = \varepsilon_o \cdot \tau_a \cdot M_b(T_o)$$

*Contribution énergétique de l'objet  $[W.m^{-2}]$*

$\varepsilon_o$  = Emissivité de l'objet [Sans unité]

$\tau_a$  = Transmittance de l'atmosphère [Sans unité]

$M_b(T_o)$  = Exittance énergétique émise par un corps noir à une température  $T_o$  équivalente à l'objet  $[W.m^{-2}]$

En plus de ne pas être un transmetteur parfait, l'atmosphère se comporte également comme une source d'émission indépendante susceptible de contribuer en conséquence à l'énergie totale mesurée par le capteur de la caméra. Aussi, le terme de contribution de l'atmosphère est déterminé par l'équation suivante.

### ■ Contribution de l'atmosphère

$$C_a = (1 - \tau_a) \cdot M_b(T_a)$$

*Contribution énergétique de l'atmosphère  $[W.m^{-2}]$*

$1 - \tau_a$  = Emissivité de l'atmosphère [Sans unité]

$M_b(T_a)$  = Exittance énergétique émise par un corps noir à une température  $T_a$  équivalente à l'atmosphère  $[W.m^{-2}]$

Enfin, l'environnement de l'objet observé ne doit également pas être négligé en tant que contributeur dans la mesure. Il émet en effet une énergie qui est ensuite réfléchiée par ce dernier, apportant là aussi une contribution parasite car ne trouvant pas son origine dans l'émission propre de l'objet.

### ■ Contribution de l'environnement

$$C_e = (1 - \varepsilon_o) \cdot \tau_a \cdot M_b(T_e)$$

*Contribution énergétique de l'environnement  $[W.m^{-2}]$*

$1 - \varepsilon_o$  = Réflectance de l'objet observé [Sans unité]

$M_b(T_e)$  = Exittance énergétique émise par un corps noir à une température  $T_e$  équivalente à l'environnement  $[W.m^{-2}]$

Finalement, la détermination de tous ces termes permet de dégager un modèle général de correction des mesures acquises pour calculer la température apparente de l'objet observé, et donc sa température absolue dès que l'on connaît son émissivité.

### ■ Modèle de correction des températures

$$T_o = \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_o \cdot \tau_a} \cdot \left[ \frac{M_t}{\sigma} - (1 - \tau_a) \cdot T_a^4 - (1 - \varepsilon_o) \cdot \tau_a \cdot T_e^4 \right]}$$

*Température absolue de l'objet observé [K]*

$T_a$  = Température de l'atmosphère [K]

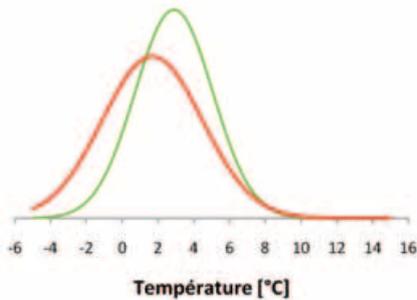
$T_e$  = Température ambiante au sol [K]

L'utilisation d'un tel modèle nécessite donc de connaître l'émissivité ( $\varepsilon_o$ ) de l'objet observé, la transmittance ( $\tau_a$ ) et la température ( $T_a$ ) de l'atmosphère, ainsi que la température ambiante au sol ( $T_e$ ). En fonction des circonstances et des données disponibles, ces paramètres peuvent être issus soit de mesures, soit de recueils d'abaques ou bien déterminés via des modèles adaptés. A titre d'exemple, la transmission atmosphérique est bien souvent estimée au moyen d'un modèle basé sur des mesures d'humidité et de température de l'atmosphère.

## Interprétation des données

L'interprétation des données a pour objectif d'établir des indicateurs permettant de caractériser les déperditions des habitations à partir des mesures de températures. Ce sont ces indicateurs simples qui auront vocation à communiquer les résultats de la thermographie aérienne au grand public. Une telle analyse s'appuie pour cela sur l'hypothèse que tous les bâtiments sont chauffés dans des conditions identiques (distribution, température et durée du chauffage identiques) au moment de l'acquisition des mesures. Bien évidemment, l'absence de chauffage dans une habitation au moment de la mesure induira une différence de température de surface au niveau du toit faible par rapport au milieu naturel. A l'inverse, une maison de retraite chauffée sans arrêt et à un degré élevé présentera très certainement une température de surface

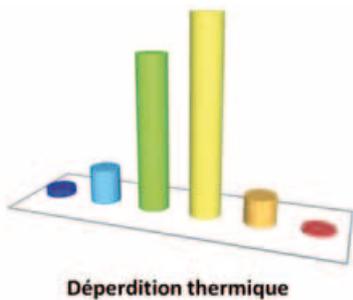




**Figure 6.** Distribution des mesures selon une loi normale (modèle Gaussien). Températures du sol (vert). Températures des bâtiments (rouge).



élevée si elle est mal isolée. Dans les deux cas, la comparaison de ces températures avec les autres habitations sera biaisée du fait de conditions de chauffage différentes. D'un point de vue statistique, les températures de surface des toits des habitations peuvent présenter des différences allant jusqu'à 14°C. Outre ces extrêmes, un examen approfondi des mêmes températures montre qu'elles se distribuent selon une loi voisine de la loi normale. Celle-ci constitue par conséquent le modèle statistique théorique appliqué aux mesures sur lequel s'appuie l'analyse menée pour caractériser les indicateurs de déperdition.



**Figure 7.** Distribution des déperditions thermiques des bâtiments sur la Ville d'Annecy : excessive (rouge), très forte (orange), forte (jaune), faible (vert), très faible (cyan) et non perceptible / nulle (bleu).

Une propriété remarquable de la loi normale est qu'elle est entièrement déterminée par sa moyenne  $m$  et son écart-type  $\sigma$ . L'interprétation est alors basée sur l'hypothèse que la moyenne  $m$  est une température représentative d'un bâtiment dit "normal" car elle est la plus présente dans la distribution, et sert donc de référence pour permettre de distinguer les bâtiments présentant



**Figure 8.** Déperditions thermiques globales des bâtiments sur Annecy (nomenclature identique à la figure 7).

une sur-déperdition thermique (température supérieure à la moyenne), de ceux présentant une sous-déperdition (température apparente inférieure à la moyenne). Mais au-delà de cette simple distinction "binaire", il semble intéressant de mieux exploiter la distribution gaussienne des températures en classifiant les bâtiments dans des intervalles probables plus petits. Les intervalles ainsi définis présentent alors une amplitude égale à l'écart-type  $\sigma$ . Au nombre de six, les classes de déperdition se répartissent par exemple de la manière suivante :

- $[m + 2\sigma ; +\infty]$  : Excessive
- $[m + \sigma ; m + 2\sigma]$  : Très forte
- $[m ; m + \sigma]$  : Forte
- $[m - \sigma ; m]$  : Faible
- $[m - 2\sigma ; m - \sigma]$  : Très faible
- $[-\infty ; m - 2\sigma]$  : Non perceptible/Nulle

L'application de cette nomenclature peut se faire aussi bien sur les températures globales de chaque bâtiment, que sur chaque élément de surface mesuré par la caméra (pixel). Il s'agit alors de procéder à une classification de l'image.



**Figure 9.** Déperditions thermiques détaillées issues de la classification des températures (nomenclature identique à la figure 7).

Le fait que la valeur de référence permettant de distinguer les différents niveaux de déperdition soit directement extraite de l'échantillon des températures implique que les résultats de différents projets ne peuvent être comparés. En effet, un même bâtiment considéré comme ayant une déperdition forte dans un cas pourrait dans un autre cas se voir attribuer une déperdition faible. Cela dépend non seulement des conditions météorologiques durant lesquelles sont acquises les mesures, mais également de la référence choisie et de ses caractéristiques d'isolation. Cette dernière devrait idéalement être fixée de manière absolue afin de rendre les résultats comparables entre eux, mais il n'existe pour l'heure aucune normalisation nationale.

## Communication des résultats

L'intérêt et l'impact d'un tel projet sont très fortement liés à la capacité de communiquer largement les résultats obtenus tout en les expliquant afin de sensibiliser la population concernée aux problèmes d'isolation de leur habitation. Cette diffusion se fait généralement sous la forme de documents cartographiques ou sites web, dans la presse ou lors de salons et manifestations. Il paraît pour cela évident que l'information présentée doit être lisible et compréhensible à tous les utilisateurs auxquels elle s'adresse. A ce titre, l'orthothermoplan ne remplit pas bien ce rôle car il ne fait l'objet d'aucune interprétation spécifique et se contente de donner les températures de surface observées. Aussi, le niveau de déperdition global des bâtiments est communément présenté comme une très bonne première approche des résultats obtenus. Il permet de connaître le diagnostic établi à l'échelle de chaque bâtiment.

Dans un deuxième temps, l'utilisateur a la possibilité de consulter la carte thermique des déperditions détaillées pour en connaître leur nature et leur répartition. Ce deuxième niveau offre l'avantage de mettre en avant les points qui dévoilent localement une faiblesse thermique. Il n'est toutefois en aucun cas suffisant pour établir un diagnostic



Figure 11. Carte thermique des déperditions détaillées des bâtiments sur Annecy.



Figure 10. Carte thermique des déperditions globales des bâtiments sur Annecy.

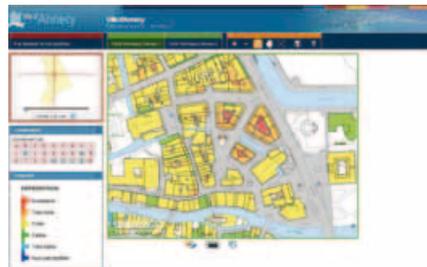


Figure 12. Serveur web cartographique mis en ligne pour la diffusion des résultats de la thermographie aérienne de la Ville d'Annecy.

énergétique poussé du bâtiment en raison des nombreuses variables qui interviennent dans une anomalie thermique dont certaines ne peuvent être résolues que par des observations sur le terrain. Au-delà des documents papiers, de plus en plus de collectivités choisissent le web comme canal de diffusion de leurs résultats. A titre d'exemple, la Ville d'Annecy a ordonné une thermographie aérienne de son territoire durant l'hiver 2007-2008 et a choisi de mettre en ligne ses résultats au moyen d'un serveur cartographique pédagogique [6].

Outre la simple communication des résultats de la thermographie aérienne, il s'avère important pour la collectivité de mener une action conjointe dans le domaine des économies d'énergie. Elle doit pour cela vérifier qu'il existe un bon relais après la diffusion au grand public des déperditions thermiques, capable en permanence d'inciter et de soutenir la population dans l'engage-

ment des travaux visant à améliorer la performance énergétique de leur habitation. Cette action se fait généralement au moyen des espaces info énergie (EIE) qui constituent ce relais en mesure d'indiquer les types de travaux à réaliser en fonction de l'état de la toiture, de l'ancienneté du bâtiment, mais encore de renseigner sur les outils disponibles pour aider à financer ces travaux.

Peu de retours d'expérience sont aujourd'hui disponibles. D'abord parce que les opérations menées sont récentes, ensuite parce qu'il est difficile de connaître et de suivre les travaux engagés suite à la réalisation d'une thermographie aérienne. Toutefois la Communauté urbaine de Dunkerque (CUD), pionnière en la matière, a mené une étude cinq ans après la réalisation de sa thermographie aérienne. Il en ressort que 1 euro investi par la collectivité pour cette opération est remboursé après cinq ans à hauteur

de 4,3 euros par le biais de créations d'emplois et de flux financiers (TVA, taxe professionnelle, etc.) [7].

La mise en œuvre de la Thermographie ne peut être qu'encourageante. ●

## Contact

Matthieu LEFEBVRE

I2G - Responsable de la production de données  
matthieu.lefebvre@i2g.fr

Les expériences citées procèdent d'un travail collectif. L'auteur remercie ses partenaires, les sociétés Aeodata et ITC.

## Bibliographie

- [1] <http://www.legrenelle-environnement.fr>
- [2] Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique
- [3] Citepa
- [4] Loi n°2004-1343 du 9 décembre 2004 de simplification du droit
- [5] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
- [6] [http://www.sig.fr/dynmapv4\\_maps/annecy\\_thermo/flash/](http://www.sig.fr/dynmapv4_maps/annecy_thermo/flash/)
- [7] M. DELEBARRE, Assises de l'énergie 2006, Grenoble.

## ABSTRACT

**Key words:** Energy saving, heat loss, aerial thermography, cartography.

*Within the framework of French engagements for the reduction of its energy expenditure, the heating of buildings presents a strong potential because of the important heat losses for which it is responsible. Aerial thermography is then an adapted tool for the global energy diagnosis of buildings in a town, department or country area. It is based on the physical laws of thermodynamics to remotely measure surface temperatures. The analysis carried out on these temperatures allows to extract indications about the heat loss level of the buildings. This information must then be the subject of a vast and adapted diffusion through various channels to sensitize the concerned people with the energy consumption of their housing and to advise them if necessary on the means to improve its thermal performance by insulation works.*

# La méridienne de France et sa prolongation jusqu'aux Baléares

■ Pierre BAYART

## ■ MOTS-CLÉS

Méridien de Paris, mesure de la base, latitude de Formentera, valeur du mètre

*Bonaventure Arago, père du futur astronome François Arago, est le maire et le juge de paix d'Estagel, petite ville des Pyrénées-Orientales, à une vingtaine de kilomètres*

*de Perpignan. Il est connu pour son humanité et son hospitalité. En 1793, un passant déjà célèbre, l'astronome Pierre Méchain, alors occupé à fermer les derniers triangles de la Méridienne, frappa à sa porte<sup>1</sup>. L'année suivante, il hébergea un blessé, Jean Lannes, le futur maréchal, alors simple soldat, rescapé des combats contre les Espagnols. En 1803, la famille Arago, et François qui a alors dix-sept ans s'en souvient, reçut de nouveau la visite de Méchain, cette fois parti pour l'Espagne et la mission aux Baléares dont il ne reviendrait pas.*

Quand, deux ans plus tard, Arago rencontra le physicien Jean-Baptiste Biot à l'Observatoire de Paris, on imagine leur dialogue et la manière dont Biot, fort surpris, interpelle le jeune étudiant.

- \_ Vous avez connu Pierre Méchain ?
- \_ Oui, monsieur. Chez mon père. Il partait en Espagne... En pleine épidémie.
- \_ Comment était-il ?
- \_ Il était ... passionné. Sur une feuille, il a tracé le méridien de Paris, puis il a tracé le 45<sup>e</sup> parallèle. Voici Dunkerque, disait-il, à 6 degrés et demi au nord, et voilà Cabrera, à 6 degrés et demi au sud.

Durant près d'une année, sous les tourelles du fier édifice du faubourg Saint-Jacques dont Méchain était le directeur, les deux jeunes chercheurs vont parler de son projet de prolongation de la méridienne de France. Ils étudieront les lettres écrites au Bureau des longitudes tout au long de son périple. Ils iront voir sa veuve qui leur remettra le journal tenu durant l'expédition. Reprendre l'œuvre de Méchain ! Prolonger la Méridienne de façon à ce que le centre de l'arc soit, comme avec Delambre il le voulait, situé à 45 degrés de latitude et ainsi pouvoir faire abstraction, dans les calculs, de la plus grande part de l'aplatissement de la Terre aux pôles. On se



Profil de François Arago par David d'Angers

© Musée Puig de Perpignan

rend chez Laplace, au fils de qui François Arago donne des cours du soir. Le doyen leur promet d'en parler à l'empereur. Ce sera chose bientôt faite, et en un temps record. Les crédits sont votés au mois de mai 1806.

On réunit le matériel : un cercle répéteur de Lenoir, un cercle plus petit du même modèle Borda, la grande lunette méridienne pour l'observation de la latitude, les baromètres, thermomètres, horloges de Berthoud, le pendule qui bat la seconde flambant neuf de l'atelier de Fortin. Les signaux lumineux, que l'on appelle alors réverbères, sont restés en Espagne, confiés par Augustin Méchain après le décès de son père, aux différents correspondants du Bureau à Tarragone et à Castellon. Ce sont en fait de grosses lampes, munies d'une cheminée en verre, que l'on fixe à des supports métalliques. Décrites comme des "lampes à courant d'air derrière lesquelles est placé un grand miroir de métal poli pour réfléchir la lumière", le combustible n'en est pas le pétrole, qui n'existe pas encore en tant que tel, mais l'huile de baleine (ou de cachalot) dont nous savons qu'une carafe est apportée à Ibiza. Nulle référence n'étant faite par la suite à ce sujet dans la correspondance ou le *Recueil d'observations*, il est à supposer qu'on en trouva sur place ou que ce carburant fut remplacé par l'huile d'olive généralement utilisée<sup>2</sup>. Il faut aussi penser aux cabanes en bois qui servent à abriter le cercle ou la batterie de réverbères des intempéries. Méchain en avait fait construire chez un artisan de Barcelone et on espère les y trouver. Tout est chargé dans une voiture qui suivra, sous la garde d'Arago, de Paris à Barcelone, celle où ont pris place Biot et José Rodriguez, le commissaire espagnol.

Le programme est simple : suivre le plan de Méchain. A savoir, avant tout, installer une station à Ibiza, située à mi-dis-

(1) Voir le cahier "Méchain et la longueur du mètre", XYZ, n° 101, décembre 2004.



Carte des îles Baléares.

tance de la côte et du méridien, y laisser un homme en charge du signal et revenir sur le continent pour, depuis les stations de Cullera et du Désert de Las Palmas, créer le grand triangle. Le plus grand triangle jamais établi par-dessus la mer, dont un côté va mesurer plus de 160 km.

Techniquement, de telles distances n'autorisent que des visées de nuit. Seul un signal lumineux émis dans l'obscurité peut être visible de si loin. Durant l'été 1807, quand il s'agira de passer en revue la triangulation de la chaîne continentale entre Valence et Barcelone, les distances n'excédant plus de 50 kilomètres, on opérera de jour. Les moyens seront alors ceux employés par Méchain et Delambre sur la méridienne de France douze ans auparavant : signaux de bois, tentes ou cabanes peintes en blanc, facilement discernables par l'optique dont on dispose.

Après être passés à Valence où leur est remis le sauf-conduit de l'Amirauté britannique indispensable pour prendre la mer, Biot et Rodriguez se présentent à Dénia au lieutenant Vacaro, commandant du *Terrible*, le petit trois-mâts de 18 mètres alloué par le gouvernement espagnol. Quarante hommes d'équipage, plus les deux officiers qui avaient accompagné Méchain et qui de nouveau seront en charge du maniement des réverbères. Le 23 octobre 1806, la "commission de mesure du méridien", selon les termes officiels de la bureaucratie madrilène, est prête à prendre la mer pour la première fois. Mais il est une chose qu'elle ignore et qu'elle va ignorer durant tout son séjour dans les îles. L'Histoire de l'empire napoléonien et des coalitions européennes qui veulent l'abattre, est venue rattraper les géodésiens.

Le jour même où ils avaient quitté Paris, le 3 septembre, était parvenue la nouvelle que le tsar de Russie renonçait au projet de paix franco-anglais alors en cours de négociation. Prudent, Napoléon a ordonné sans délai de placer en ordre de bataille la Grande Armée restée stationnée en Bavière après Austerlitz et, trois semaines plus tard, l'empereur partira en Allemagne se mettre à la tête de ses troupes. La guerre va reprendre et tout au long des vingt mois que dureront en Espagne les travaux des envoyés du Bureau des longitudes, venir ponctuer de ses bulletins, manœuvres maritimes, coups de tonnerre et de canon, le déroulement des opérations géodésiques. Cela commence à Valence à la mi-octobre. Des bruits courent en ville que les Français sont défaits en Allemagne et que l'Espagne a déclaré la guerre à Napoléon. Le consul de France

vient dire à Arago qu'il faut fuir. Mais Biot et Rodriguez sont déjà à Dénia, prêts à s'embarquer, en pleine ignorance de ce qui se passe. Le même jour, à Iéna, les Français triomphent de la Prusse. Biot passera les deux semaines de son séjour à Ibiza sans le savoir et dans une angoisse que lui-même peine à décrire.<sup>2</sup>

D'autant plus que l'installation de la station d'Ibiza se déroule dans des circonstances fort délicates. Après être monté sur la colline des Massons, choisie par Méchain en 1804, le site se révèle trop bas et mal situé par rapport aux autres sommets de Formentera et de Cullera.

*Le rayon visuel mené de Cullera au sommet de Los Massons, écrira-t-il<sup>3</sup> à son retour, rase plusieurs montagnes élevées, et particulièrement cette montagne de Campvey dont on m'avait parlé au port d'Ibiza. Il est par conséquent impossible de découvrir aucune partie de la côte d'Espagne qui soit plus avancée vers le sud. Vers le nord, la vue est libre et peut s'étendre jusqu'au Désierto de Las Palmas, mais il serait extrêmement difficile de reconnaître Los Massons quand on serait au Désierto, parce que cette colline est enfoncée dans les terres et qu'elle se projetterait sur des montagnes plus élevées qu'elle. Or c'est là un très grand inconvénient lorsqu'il s'agit de diriger des réverbères à une si grande distance, et il est de la dernière importance de choisir des points sur lesquels on ne puisse point se méprendre.*

Biot décide donc de déplacer la station au sommet du Campvey, de 400 mètres d'altitude et qui offre la meilleure visibilité au sud sur Formentera et, du côté du continent, va permettre la découverte de ce qui sera la nouvelle station méridionale du canevas continental : le Montgo, dont la crête surplombe Dénia et que l'on voit par temps clair à l'œil nu tant d'Ibiza que de Formentera. Mais durant les trois jours que Biot passe au Campvey, des nuages bouchent l'horizon. Il est impossible de distinguer le Désert de Las Palmas, d'où doivent avoir lieu les premières visées. Le ciel reste couvert et on doit orienter la batterie de réverbères à la boussole en se fiant à la carte de Tofiño, la seule dont on dispose. La visite de Formentera, en revanche, est plus fructueuse. La station de triangulation qui devra se transformer en observatoire pour la mesure de la latitude, et peut-être aussi de la base, se trouve hébergée dans une ferme située au point culminant de la petite île.

*J'ai déjà reconnu et arrêté sur la cime de la Mola une maison où l'on placera les instruments pour observer la latitude et le pendule. Par une des fenêtres de notre petit observatoire, nous verrons Cabrera et Majorque. Par une autre fenêtre, nous découvrons tout Ibiza, et la côte d'Espagne depuis Alicante jusqu'à Cullera. Enfin, au sud, nous avons l'Afrique, et s'il faut s'en rapporter à des témoignages que notre séjour à Formentera nous mettra en état de vérifier, peut-être ne serait-il pas impossible d'aller planter un jour des réverbères sur les côtes de Barbarie.<sup>4</sup>*

(2) Voir "La méridienne de France et l'aventure de sa prolongation jusqu'aux Baléares" de Pierre Bayart, Editions L'Harmattan, Paris, 2007.

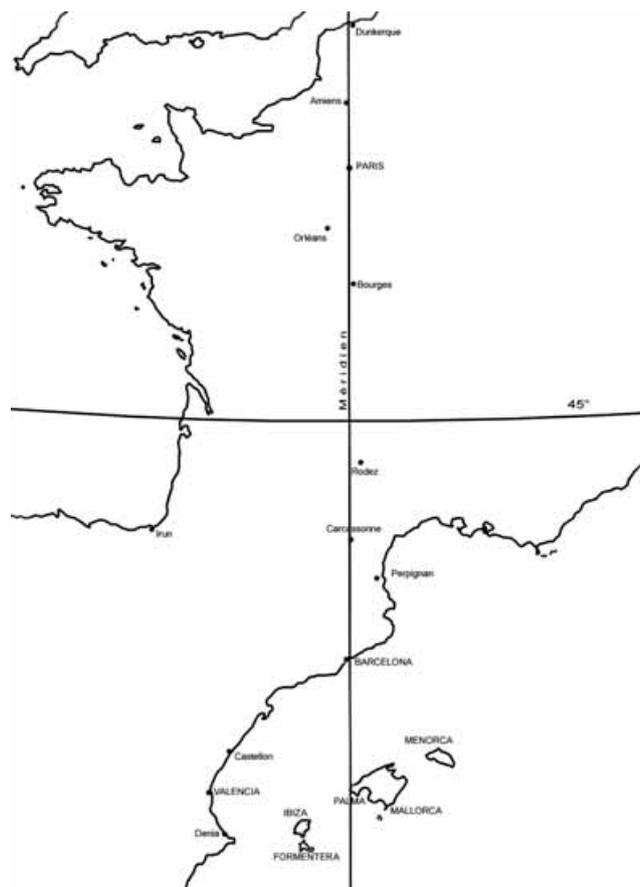
(3) Lettre de J.-B. Biot du 7 décembre 1806.

(4) Ce qui sera fait à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

▶ Le Français, secondé linguistiquement par José Rodríguez, loue le local pour six mois, ainsi que deux chambres adjacentes en vue de pouvoir dormir sur place. Puis, toujours inquiet et ignorant en cette fin d'octobre, de ce qui se passe sur le continent et en Allemagne, il tâche de hâter le retour à Dénia. Le mauvais temps persistant l'oblige à une attente éprouvante sur le port d'Ibiza. Au comble de l'incertitude, contre le gré du lieutenant et l'avis de tous, il ordonne au commandant Vacaro de prendre la mer. Celui-ci s'exécute. C'est la catastrophe. La petite embarcation est prise dans la tourmente, drossée et ballottée pendant deux jours au sud de l'île. Le navire parvient tout de même à se rapprocher du port. Sans y parvenir. Et Biot se fait déposer, en compagnie du capitaine sur l'îlot d'Espalmador pour attendre que la tempête se calme. C'est là qu'il contractera apparemment la fièvre qui se déclare dès son retour sur la péninsule. Là de nouveau, le retard va s'accumuler dans le programme. D'autant que le signal d'Ibiza reste obstinément invisible. Alors qu'ils voient le soir les hauteurs du Campvey éclairées par le couchant, il demeure impossible de distinguer le signal lumineux qu'inlassablement José Rodriguez maintient allumé chaque nuit. Jusqu'à ce soir du 4 décembre 1806, où le génie de Biot, heureusement guéri de ses fièvres, et celui d'Arago, trouvent une solution.

*Nous plaçâmes le plan de notre cercle dans une position horizontale ; puis, au coucher du soleil, un soir que le ciel était parfaitement serein, et que le beau temps et l'absence de la lune promettaient une nuit profondément obscure, nous promenâmes lentement l'une de nos lunettes le long de l'horizon de la mer, jusqu'à ce qu'elle rencontrât les montagnes d'Yvice qui s'élevaient au-dessus de cet horizon à d'inégales hauteurs. Après les avoir longtemps examinées, nous choisîmes la plus haute, la plus au nord, celle dont le sommet nous paraissait le plus découvert, celle, en un mot, dont l'aspect et la forme ressemblaient davantage à ce que j'avais remarqué dans la montagne de Campvey. Certains que c'était là le lieu précis où étaient placés nos feux, nous fixâmes la lunette dans cette position, et nous attendions avec une vive impatience que la nuit, devenue tout à fait sombre, nous permit de les distinguer. Cette fois notre espérance fut satisfaite : nous aperçûmes dans le champ de la lunette un point lumineux, très petit, presque imperceptible, semblable à une étoile de cinquième ou sixième grandeur, mais qui se distinguait d'une étoile par son immobilité. Ce n'était donc pas une impossibilité physique qui avait arrêté nos observations ; c'était une difficulté désormais connue et facile à surmonter, en traçant sur notre cercle des indices qui pussent nous faire retrouver justement cette direction, au milieu de l'obscurité la plus profonde. C'est ce que nous fîmes en dirigeant la seconde lunette de notre cercle sur un autre signal de feu placé seulement à dix lieues de distance, et qui était visible presque toutes les nuits à cause de sa proximité. En lisant sur le cercle l'angle compris entre les deux lunettes, cet angle, une fois connu, permettait de diriger exactement l'une d'elles sur le signal d'Ibiza dès que l'autre l'était sur le signal voisin.*

Durant la longue attente de l'apparition du signal d'Ibiza, s'est effectuée la création de la station du Montgo à Dénia. Du fait



**Le méridien de Paris de Dunkerque à Formentera coupé par le 45<sup>e</sup> parallèle à égale distance des deux extrémités de l'arc.**

du report vers le sud de près d'un demi-degré de l'extrémité de l'arc par l'établissement d'une station à Formentera, la station initialement prévue à Cullera est devenue obsolète et la découverte à l'œil nu du Montgo depuis les deux îles, décidera les géodésiens à y installer le sommet austral du grand triangle. Pour accéder à la cime, à 750 mètres d'altitude, il a fallu creuser un chemin dans le lapiaz qui constitue la roche supérieure de la petite chaîne de montagne. Un abri de pierre et de bois rudimentaire et des tentes permettent de demeurer auprès des réverbères. Les matelots du *Terrible* s'y sont installés et le premier signal est allumé au début de décembre afin de prendre l'angle avec Ibiza. J.-B. Biot a obtenu du Capitaine général de Valence que des mesures soient prises pour leur bon repérage.

*D'ici à ce que nous ayons terminé les observations du grand triangle, il sera ordonné par toutes les justices du pays que l'on ne fasse point de feux sur les montagnes à 2 lieues de distance de nos stations, afin de ne pas confondre nos signaux avec des feux de bergers.*

Par le même courrier, il fait part au Bureau des longitudes des dégâts qu'a subi le cercle durant le voyage depuis Paris et qu'il vient de constater à son retour au Desierto de Las Palmas.

*Il est arrivé un très grand malheur au cercle que nous avons emporté de Paris. En l'emballant, on n'avait point attaché fixement la lunette supérieure, ou au moins on s'était contenté de la serrer par ses vis, ce qui est un très mauvais moyen. De sorte que dans tout le voyage, elle a frotté sur le plan du limbe,*



*a usé les divisions, (...), et finalement s'est rompue et brisée en morceaux.*

Biot écrit le même jour à M. de Vandeuil, ambassadeur à Madrid, pour lui demander de lui faire prêter un cercle de Borda qu'il sait se trouver à l'observatoire espagnol. On lui accorde ce prêt sans tarder et l'envoi est effectué dans les trois jours. En attendant, l'habile technicien qu'il est, ne se laisse pas abattre par le mauvais sort.

*Il m'a paru que notre pauvre cercle n'était pas tout à fait dans un état désespéré. Il a encore trois verniers en état de servir, et en faisant une observation de plus, on peut toujours éviter de tomber sur la partie usée des divisions. J'ai fait venir un ferblantier de Castellon, c'est tout ce qu'il y a de mieux près d'ici en fait d'ouvriers. Je lui ai fait construire une lunette en fer blanc ; nous avons remplacé les vis perdues, raccommodé les pièces brisées et enfin le cercle a été remis en état de servir à peu près aussi bien qu'auparavant, quoi qu'il n'ait pas une aussi belle apparence. Je me suis rappelé à cette occasion ce mot de Franklin, que celui qui ne sait pas scier avec une vrille et percer avec une scie ne doit pas se mêler de faire de la Physique. Je ne savais pas que cela fût aussi applicable à l'astronomie. Au reste notre petit cercle a seul éprouvé la rigueur du sort, le grand cercle, celui qui nous sert actuellement pour le grand triangle, n'est nullement endommagé.*

Cela leur permettra de continuer les observations des stations environnantes du Desierto et d'en mesurer les angles les jours où la station d'Ibiza reste invisible en raison du temps couvert. Arago se dépense sans compter, par monts et par vaux, dans la campagne et les collines valenciennes. Les pittoresques aventures relatées dans ses mémoires, où il a affaire entre autres à un fiancé jaloux et au chef des brigands de la région qu'il loge dans sa cabane, se situent principalement à cette époque du début 1807.

Au mois de février, Le *Terrible* effectuera un aller-retour à Ibiza pour relever les matelots en service à la station dirigée par José Rodriguez et lui demander d'orienter maintenant les signaux vers le Montgo afin d'y mesurer le deuxième sommet du grand triangle : Desierto-Campvey. La distance est alors bien moindre que depuis le Desierto et la mesure s'opère sans problème. L'un des officiers en poste au Montgo dit, en exagérant sans doute un peu, pouvoir compter dans la lunette du cercle répétiteur les arbres de Formentera, distante de 120 kilomètres... Rodriguez y a, durant janvier et février, achevé l'installation de la station de la Talaiassa<sup>5</sup> afin de préparer les supports pour les instruments, le percement de nouvelles ouvertures dans le grand cellier qui va bientôt se convertir en observatoire.

Le 26 février 1807 est une date importante dans l'histoire de la Commission et aussi de la vie de François Arago. Logé à Dénia avec J.-B. Biot chez le vice-consul français, Jean Morand, le jeune homme célèbre ce jour-là son vingt-et-unième anniversaire. Ce moment était probablement attendu. L'insistance avec laquelle Biot dans ses lettres au Bureau réclame alors expressément qu'on le laisse rentrer à Paris

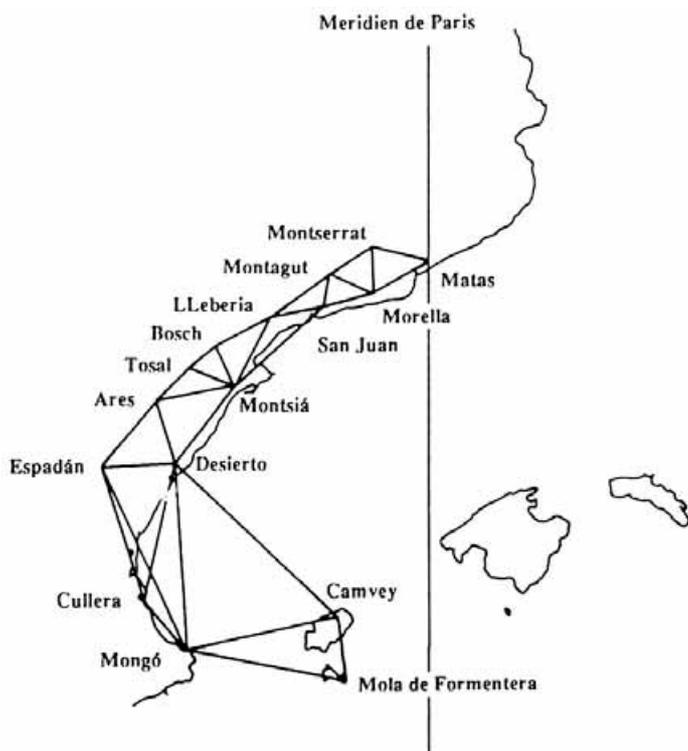
(5) Nom de la grande ferme occupant le point culminant de l'île de Formentera, à 200 mètres d'altitude, d'où était assurée traditionnellement la surveillance de la mer.

pour y retrouver sa femme et ses jeunes enfants qu'il n'a pas revus depuis six mois déjà, laisse supposer qu'un accord avait dû se conclure entre les deux hommes quant à la suite des opérations. Que se passe-t-il ? Episode connu, mais sans que le détail n'en ait été jamais clairement élucidé, une brouille a surgi entre les deux astronomes. Biot y fait indirectement allusion dans sa correspondance et profite, semble-t-il, du changement de statut d'Arago, qui cesse d'être son assistant et devient officiellement adjoint au Bureau des longitudes, pour en faire son remplaçant à la tête de la Commission en son absence. Cette absence et cette délégation de responsabilité à Arago dureront de mai jusqu'à novembre 1807. Des tractations ont eu lieu entre Jean-Baptiste Biot et le Bureau dès la mi-mars afin à la fois de nommer Arago adjoint, poste auquel il peut accéder du fait de sa majorité, et de lui confier, en plus de la révision des stations continentales durant l'été, l'exécution de la mesure de la base. En arrivant en octobre 1806 à Formentera, Biot y avait remarqué tout de suite la facilité qu'il y aurait selon lui à mesurer sur le plateau de la Mola la base nécessaire à l'extrémité de l'arc. A ce moment-là, il envisageait de pouvoir achever les mesures du grand triangle en janvier ou février 1807, de terminer la mesure du grand triangle avant les chaleurs de l'été et de garder en suspens la question de la base pour la campagne d'automne. Le retard accumulé et l'évolution incertaine des relations politiques entre la France et l'Espagne vont faire que le programme s'oriente vers d'autres solutions. La détermination de la latitude à Formentera est une opération astronomique maîtrisée. Deux commissaires logés et nourris sur place s'en chargeront sans problème l'hiver suivant à condition de disposer de suffisamment de nuits claires. Conditions qui se trouveront réunies à la Talaiassa.

Pour ce qui est de la base, tout s'est joué autour de la négociation et d'un traité de paix provisoire entre Biot et Arago. Ce dernier, afin de faire ses preuves et se montrer digne de la confiance que lui font les membres du Bureau des longitudes en le nommant adjoint, élabore le plan qui permettra de résoudre l'épineuse question de la mesure d'une base. En effet, chacun s'accorde à reconnaître qu'il est peu vraisemblable de pouvoir apporter à Formentera, ou même à Ibiza les règles destinées à la mesure. L'emploi des lourds instruments utilisés jadis à Melun et à Perpignan sur la Méridienne, sera semble-t-il, et d'un commun accord, écarté. En faire fabriquer sur place, c'est-à-dire uniquement à Barcelone où il serait plausible de trouver les métallurgistes capables de reproduire à l'identique les barres de platine munies de leur petite lame de laiton pour en contrôler la dilatation, reste fort aléatoire. On y renonce. On y renonce aussi aisément que François Arago va proposer une alternative à ce type de mesure qui rencontrera l'agrément du Bureau.

Observant la carte de leurs stations et de l'archipel Baléares, il remarquera en effet que les sites de Cullera au sud de Valence, Campvey à Ibiza et l'île de Cabrera au sud de Majorque, repérée autrefois par P. Méchain pour y créer une station, sont alignés plus ou moins sur le même parallèle. Il conviendrait donc de déterminer les trois degrés qui les séparent pour obtenir une valeur qui jouerait fort bien le rôle de





Plan général de la triangulation du prolongement des mesures au sud de Barcelone.

► vérification attendu de la mesure d'une base par les moyens utilisés jusque-là. Et c'est ce qui va décider le Bureau à autoriser l'ouverture d'un triangle sur Majorque, y créer une station et à la joindre aux deux sommets d'Ibiza et Formentera qui viennent d'être établis.

Nouvel épisode et véritable rebondissement dans le programme initialement prévu qui vient couronner par ce rapprochement définitif du méridien, qui frôle l'île majeure des Baléares, l'œuvre du défunt Méchain. Un dix-septième triangle. Campvey à Ibiza, la Talaiassa à Formentera, station la plus australe de tout le canevas et la station qu'Arago et José Rodriguez, après le départ de Biot, ont alors l'intention d'installer dans l'îlot de Cabrera. Mais une fois de plus les choses ne se passent point comme prévu. Le mont San Salvador, qu'il était entendu d'utiliser à l'intérieur de Majorque pour relier Cabrera à l'aide d'un triangle, se révèle invisible depuis la station d'Ibiza, masqué, ironie de la géographie, par la colline des Massons, la cime initialement choisie par Méchain et qu'on avait abandonnée au profit de Campvey. Le conseil donné par les meilleurs connaisseurs de la région est d'utiliser les montagnes visibles depuis Ibiza et Formentera : l'un ou l'autre des deux sommets avoisinants 1 000 mètres du massif du Galatzo. La meilleure option se révélera être la Mola de l'Esclop (925 m), le plus bas des deux, mais le plus rapproché du méridien qui passe sur la Dragonera, à moins de douze kilomètres de là.

Ceci pour la triangulation. Car mesurer la différence de longitude entre deux points reste encore au XIX<sup>e</sup> siècle une opération assez complexe, et comporte un problème qui ne sera résolu correctement qu'avec l'apparition du télégraphe électrique. Pour

y faire face, on doit effectuer, et observer, une rapide occultation de la lumière d'un réverbère à un moment donné en ayant pris soin de régler au temps sidéral l'horloge de chacune des deux stations par des observations astronomiques.

Au mois de janvier 1808, une fois Biot rentré à Paris, Arago entreprend sans tarder les premières visées de la montagne majorquine depuis Formentera, puis d'Ibiza au Campvey et s'apprête à se déplacer enfin à Majorque afin d'y installer la station de l'Esclop où Rodriguez a fait aménager un abri pour les instruments et les hommes qui les accompagneront. Mais dès leur arrivée à Palma, le 9 avril, une étonnante agitation règne en ville. On vient d'apprendre la chute du gouvernement de Godoy et l'abdication du roi en faveur du prince Ferdinand VII qui provoquent une explosion de liesse populaire. A la nouvelle du soulèvement du 2 mai à Madrid et de la création d'une junte de gouvernement antifrançaise à Valence, le peuple de Palma se déchaîne soudain.

L'atmosphère d'émeute et l'évolution des événements politiques durant tout le mois d'avril a empêché Arago de commencer les travaux et quand il est enfin à pied d'œuvre aux premiers jours de mai et commence la triangulation, la populace, croyant qu'il est chargé de faire des signaux aux troupes françaises que l'on suppose en train d'envahir les îles, se lance à sa recherche. Une troupe fanatique prend le chemin de l'Esclop pour s'emparer du traître. Grâce à l'aide du fidèle Damian, le pilote ibizain du *Terrible*, il parviendra à se déguiser en marin et sa bonne pratique du catalan fera le reste au moment de croiser sur le sentier les hommes en armes venus s'emparer de lui.

Afin de le soustraire à la vindicte populaire, le Capitaine général n'a d'autre moyen que de faire incarcérer le jeune astronome au château de Bellver. Il y passera deux mois, jusqu'à ce que sa libération et son extradition à Alger soient négociées grâce à l'entremise de José Rodriguez. Tout ceci est conté dans "Histoire de ma jeunesse", les mémoires d'Arago, écrits longtemps après les faits et dont on ne retient généralement que le pittoresque des aventures et peu d'éléments se référant à l'achèvement des travaux de mesure. Des trois degrés de parallèle, un peu plus d'un et demi peut être considéré comme établi grâce aux mesures d'angle effectuées à la Mola de l'Esclop au mois de mai 1808.

La valeur du mètre, calculée à Paris en 1809 d'après les données rapportées des Baléares, montre pourtant une variation bien infime de celle établie par Delambre et Méchain sur la méridienne de France. Biot affirme en 1810 devant la classe de sciences physiques et mathématiques de l'Institut qu'elle est "d'un ordre inférieur au dix millièmes de ligne<sup>6</sup> et ne produirait que quatre dixièmes de mètre sur la longueur de l'arc compris entre Dunkerque et Formentera". ●

(6) La ligne est la plus petite division de l'ancienne toise, qui mesurait 1 m 949. Une toise se divisait en 6 pieds, le pied en 12 pouces et le pouce en 12 lignes. Ce n'est que bien passé le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle que les auteurs et le commun des mortels commencèrent à adopter dans le langage courant le vocabulaire du système métrique.

# Le programme de Schut déclenche l'alerte à Montréal

■ Jean TARIEL

*Fin des années 60 - début des années 70 : je suis assistant de recherche au département de photogrammétrie (Dr. A. J. Brandenberger) de l'université Laval à Québec. A l'époque le programme de Schut (du nom de celui qui le mit au point) était l'un des premiers permettant le calcul sur ordinateur des triangulations aériennes. Mis au point au Conseil national de recherches Canada, ce programme de compensation polynomiale d'un aérocheminement repose sur la théorie de la déformation de la bande. Il permet aussi la liaison de bandes entre elles pour former un bloc.*

Comme on le sait un bloc est constitué de bandes parallèles se recouvrant en général latéralement de 25 %. Un projet de recherche, confié à mon collègue Jacques H., avait été lancé pour étudier si un recouvrement latéral de 60 % pourrait assurer une plus grande rigidité du bloc et de ce fait garantir une meilleure précision de l'altimétrie des points de détail. Une partie de la ville de Montréal avait fait l'objet d'une prise de vues répondant à ce recouvrement particulier. De nombreux repères de nivellement existant dans la zone permettaient d'équiper les photographies des points d'appui altimétriques nécessaires au calcul, mais surtout de fournir un abondant réseau de points de contrôle.

Contrairement à ce que nous connaissons en France et en Europe, les repères de nivellement de la ville de Montréal ne sont pas scellés sur une structure située en surface. Ils sont logés dans de petites cavités souterraines, le plus souvent situés au milieu de carrefours, protégés par de petites plaques de fonte semblables à celles que l'on trouve sur les trottoirs et les chaussées.

Le responsable du projet demande mon aide pour équiper les photographies. Outillés d'un véhicule automobile, du répertoire des repères et de tirages photographiques, le travail consiste à "remonter" l'altitude du repère au niveau de la chaussée. Jacques H. au volant immobilise le véhicule au milieu du carrefour, signale son immobilité à l'aide des feux de détresse ; j'en descends, soulève la plaque à l'aide d'une clef, mesure la distance entre la tête du repère et le niveau de la rue et annonce la lecture. L'opération demande quelques minutes.

Le travail s'étale sur deux jours. Le premier se déroule sans incident. En début d'après-midi du second jour, je constate en

me relevant, quelque peu surpris, que nous sommes entourés de voitures de police stationnées à distance respectueuse, au débouché de chacune des rues. Après un moment d'hésitation l'un des policiers, probablement le plus courageux, s'approche de nous. Quand même prudent sa main repose près de son revolver, genre colt. Sait-on jamais ? Au vu de nos papiers qu'il nous réclame, il procède à un rapide interrogatoire : nom, prénom, date et lieu de naissance, etc. Satisfait par ce premier examen il nous demande de lui montrer ce que nous sommes en train de faire. Nos explications le satisfont et c'est là qu'il nous annonce que depuis quelques heures toutes les forces de police de la ville sont à notre recherche ! Mon dieu, pour quelles raisons ? En fin de matinée des appels téléphoniques avaient signalé que **deux individus, se déplaçant à bord d'un véhicule aux couleurs de l'université Laval, plaçaient des bombes dans les canalisations de gaz !**

La fin de la journée se passa sans autre incident et nous fûmes salués à plusieurs reprises par les voitures de police que nous rencontrions.

Sans pouvoir davantage préciser la date de cette anecdote je la situe avec certitude au début de l'été 1971. L'année précédente le Canada, avait été secoué par ce qui fut appelé "la crise d'octobre". Des membres du Front de Libération du Québec (FLQ) avaient enlevé à Montréal le délégué commercial britannique James Richard Cross et le vice-premier ministre et ministre du travail du gouvernement provincial Pierre Laporte. Le premier fut libéré contre l'engagement du gouvernement de satisfaire à certaines exigences et versement d'une rançon. Le second fut retrouvé mort, assassiné selon la version des autorités, accidentellement selon les ravisseurs. Entre octobre 1970 et avril 1971, le gouvernement fédéral avait instauré le régime des pouvoirs spéciaux qui jusqu'alors n'avaient été mis en œuvre qu'au cours des deux guerres mondiales. C'est dire la psychose qu'avait provoqué cette "crise d'octobre".

Au cours de la matinée nous avons traversé des quartiers à majorité anglophone : ceci explique probablement cela. Et pour ce qui est du recouvrement latéral des bandes on en est toujours resté à 25 %. ●

## Contact

Jean Tariel  
tariel@itc.nl

## Aurélie Nemours : alignement du XXI<sup>e</sup> siècle

■ Jean-Pierre MAILLARD

*Rennes, la capitale de la Bretagne, est une ville à croissance soutenue dont le développement profitera dans quelques années du prolongement de la ligne TGV à construire jusqu'aux portes de la cité comme cela vient d'être annoncé. Sa rocade encadre les quartiers anciens et nouveaux en délimitant le périmètre à vocation urbaine. Au nord-ouest les réserves foncières sont aménagées par la société Territoires, la SEM de Rennes métropole, dans le cadre de zones d'aménagement concerté (ZAC). Outre des logements, l'opération du quartier Beauregard accueille la préfecture, nombre d'équipements publics et privés ouverts sur le parc éponyme dont l'étendue verte est dédiée au thème du Soleil. On y trouve notamment un cadran solaire géant de 100 m de diamètre qui a la particularité d'être "sans style" autrement dit dépourvu d'axe et donc sans ombre portée. Pour connaître l'heure il revient à celui qui s'en inquiète, si le Soleil est suffisant, de jouer le rôle de flèche...*

Dans cet environnement solaire, à l'emplacement de la future esplanade de l'entrée du parc, une place primordiale a été affectée à l'unique sculpture monumentale d'Aurélie Nemours "Alignement du XXI<sup>e</sup> siècle", prolongement contemporain de la tradition des alignements préhistoriques. La décision municipale a été grandement facilitée par la présence dans la ville de la galerie Oniris qui promeut avec constance l'abstraction géométrique.

### Alignement du XXI<sup>e</sup> siècle

Sur un terrain de 26,1 m de longueur sur 22,5 m de largeur, sont ordonnées 72 colonnes monolithiques taillées dans du granit du pays dont l'axe principal de l'ensemble est orienté nord-sud. De section carrée de 90 cm de côté, chaque élément a une hauteur de 4,50 m et une couleur gris-bleu uniforme. Sur la longueur neuf éléments sont alignés et implantés avec un écartement régulier de 1,80 m. Côté largeur, également dressées, huit colonnes distantes entre elles de 2,70 m complètent la trame de l'œuvre. Le croisement orthogonal des lignes fixe la position des autres monolithes, parfaitement rangés comme le seraient les acteurs d'une parade militaire. L'entrecolonnement permet la déambulation à l'intérieur de l'espace et fait jouer, s'il y en a, les ombres portées



© Jean-Pierre MAILLARD

sur le sol et sur chaque monolithe voisin. Quand il est midi, l'ombre de chaque colonne se superpose exactement à la suivante et ainsi, à ce moment-là, c'est un deuxième cadran solaire qui équipe le parc urbain.

La proposition constitue une évolution 3D de l'œuvre peinte d'Aurélie Nemours précisément la série intitulée "Rythme du millimètre". L'artiste s'est appliquée sur les toiles, à main levée, à faire comme des pages et des pages de carrés. Une fois la dimension de l'unité et l'espacement retenus, elle s'est obligée, dans une démarche d'ascèse, à répéter la forme unitaire en respectant les alignements et les écartements. Par exemple, son tableau de 1,20 m de côté "Rythme du millimètre l'innombrable" comporte près de dix-huit mille carrés

noirs et 270 lignes blanches dont l'exécution a nécessité plus d'un an de travail. La dimension méditative de sa production est renforcée par l'utilisation la plus fréquente d'une palette de couleurs limitée au noir et au blanc.

Pour Aurélie Nemours, la composition rennaise constitue sa première et seule approche de la troisième dimension. Serge Lemoine pense qu'avec Alignement du XXI<sup>e</sup> siècle, "elle a voulu créer une œuvre totale qui allie la matière et l'esprit, qui exprime la permanence et le changement".

L'aménagement de l'esplanade du parc de Beauregard restant à finaliser, la perception de l'ouvrage n'est pas définitive. La réalisation correspondante devrait gommer l'actuelle opposition



© Joseph MOREL



entre la rigueur de la composition et les herbes folles car sa rigoureuse géométrie ne peut en aucun cas être reçue comme les alignements mégalithiques du passé. Même si le titre de l'œuvre, la nature et le volume des colonnes évoquent instantanément les menhirs, monuments emblématiques de la Bretagne, elles ne sont pas aujourd'hui regardées comme tels, faute d'absence de mystère sur son origine, de la patine du temps avec des lichens sur les pierres et de l'écrin de la lande bretonne pleine de genêts, d'ajoncs et de bruyère aux couleurs jaune et violette.

Devant l'envergure du projet, la ville de Rennes a sollicité le mécénat de proximité, une façon d'impliquer dans la vie culturelle métropolitaine et son rayonnement national pas moins de dix-sept entreprises de la région, le concours privé ayant porté le financement de 20% de la réalisation d'un coût total de 1 580 000 €.

## La réception des pièces et leur implantation

Le cahier des charges de la fourniture des monolithes définissant la métrologie des colonnes était extrêmement précis et rigoureux à l'instar du projet d'Aurélie Nemours. Son respect par le carrier tient de la performance car les parallélépipèdes de granit devaient être quasi parfaits. Ainsi, l'angle droit des sections courantes était soumis à une précision de 0,9g pendant que les

mesures de la longueur des côtés et celle de la hauteur étaient, elles, contraintes à une exactitude fixée à moins d'un cm. Le contrôle du réalisé, notamment celui de la rectitude des faces a été effectué par mesures 3D d'un échantillonnage de dix colonnes. In fine seules deux colonnes ont été écartées.

Le service CARTE<sup>(1)</sup> de la ville de Rennes a assuré, en régie, la maîtrise d'œuvre des travaux, implanté l'axe principal, nord-sud, le confondant ainsi avec le méridien du lieu, défini une méthode de mise en place de chaque pièce de l'ensemble et posé un régllet métallique sur le périmètre de la plate-forme support de l'œuvre. Ce régllet a reçu des encoches positionnées avec précision comme destinées à recevoir la pose d'une trame de fils nécessaire à une implantation classique, par alignement direct, la verticalité étant suivie à l'aide de deux théodolites.

## Aurélie Nemours

Peintre et poète, Aurélie Nemours est née à Paris le 29 octobre 1910. Elle appartient à la génération des peintres géométriques abstraits actifs après la seconde guerre mondiale. Elle a fait des études d'archéologie à l'École du Louvre puis a travaillé successivement dans les ateliers de Paul Colin, André Lhote et Fernand Léger pour lequel elle avait le plus d'admiration. En quittant son atelier, elle disait avoir trouvé "la force de la solitude".

Son chemin vers l'abstraction se cristallise très tôt en affirmant : "la découverte de la portée spirituelle de la verticale m'a fait renoncer aux séductions tentatrices de l'oblique". Dès lors elle utilise un nombre restreint de formes : tirets, angles droits, croix, points, surfaces carrées ou rectangulaires. L'assemblage de ces formes procède de la pensée et sert sa recherche de signe jusqu'à la limite du vide qui cependant, selon l'artiste, "n'est pas le néant". A compter de 1949, pendant trente ans, elle participe régulièrement au Salon des réalités nouvelles et se fait remarquer en France et à l'étranger tant par des galeries que par des peintres tels Auguste Herbin et Gottfried Honegger. Ce dernier lui ménage d'ailleurs une large place dans sa collection présentée à l'Espace d'art concret de Mouans-Sartoux (Alpes-Maritimes).

En 1994, elle est lauréate du prix national de peinture. Puis, en 1996 et 1997 elle conçoit l'ensemble des vitraux de l'église du prieuré de Notre-Dame Salagon, sanctuaire roman en Haute-Provence dans lequel dialoguent le patrimoine et la création contemporaine. Cette fois, la couleur monochrome est "le rouge le plus pur qui existe".

Son travail pictural est complété par la publication de plusieurs recueils et ouvrages. Ils expriment son attachement à Haïti et sa poésie pleine de rigueur profonde puisque, par exemple, elle appréhende le rythme comme un édifice et perçoit l'infini de l'instant.

Aurélie Nemours est décédée le 27 janvier 2005 avec la satisfaction d'avoir vu en 2004, au Centre Pompidou, une rétrospective de son œuvre sous le titre qu'elle a elle-même choisi, "Rythme, nombre, couleur" qui synthétise bien sa constante méditation sur l'ordre du monde et la certitude qu'un "Beaugard" restera attaché à son ultime création. ●

○ Pour tout renseignement :  
[www.rennes.fr](http://www.rennes.fr)  
[www.galerie.oniris.free.fr](http://www.galerie.oniris.free.fr)

(1) CARTE : Cartographie et 3D, Administration des SIG, Reprographie, Topographie, Edition.

# Géomètres Sans Frontières, le changement dans la continuité

■ Claire GALPIN

*Il aurait été dommage de ne pas reprendre le flambeau de cette belle association. Alors sans beaucoup réfléchir, un nouveau bureau s'est constitué, comme un trait d'union entre Est et Ouest de la France. Nous attendons tous nos amis du Nord et du Sud afin de faire vivre l'association.*

**N**ous profitons de cet espace qui nous est réservé pour donner quelques lignes directrices de ce que sera l'activité de GSF.

Nous continuons les actions engagées par nos prédécesseurs... et tentons d'imprimer une pointe de changement en proposant de développer le caractère ONG que suggère notre nom, Géomètre Sans Frontières.

L'ancien bureau suit et supervise le projet monté par deux étudiants en géomatique à l'ESGT, qui partent cet été au Burkina Faso. Le séjour et le voyage semblent bien préparés. Nous lirons donc avec plaisir à la rentrée, le récit de leurs aventures.

Le nouveau bureau s'occupe du groupe de 9 élèves de l'ESGT, qui comme chaque année, part à Madagascar pendant 6 à 8 semaines. Notre soutien, cette année, est simplement administratif : signature des conventions de stage avec l'ESGT. Au programme, deux activités. Une partie du groupe s'investit dans une action qui semble se pérenniser au fil des ans, soutien aux travaux

pratiques de l'école polytechnique de Tana et l'autre est engagée dans la réalisation de travaux topographiques au cœur de la forêt tropicale. Nous aurons sûrement un compte rendu passionnant dans un prochain numéro de la revue. J'aimerais que ces actions de parrainage soient plus largement suivies et qu'elles soient le lieu d'échanges entre professionnels et étudiants. En effet, l'an dernier, Gilles Huet, cadre salarié et sponsorisé par son cabinet – qui a offert le billet d'avion et libéré du temps – a accompagné un groupe d'étudiants ESGT à Galle au Sri Lanka. Leur mission s'inscrivait dans le cadre de la reconstruction post tsunami.

*"Le groupe était hétérogène, mu par une même curiosité mais avec des approches différentes de la coopération et du bénévolat. Je suis très heureux d'avoir pu partager quelques jours avec ces jeunes et j'espère que je leur aurai apporté un peu de mon expérience. Pour moi le contact et les échanges avec les étudiants ont été fort intéressants"* a confié Gilles Huet.

C'est une enrichissante initiative inter-

générationnelle qu'il nous faut absolument développer.

Au cours de mes voyages, j'ai pu constater que de nombreux pays sont dépourvus de structures de formation pour les métiers du foncier et de la topographie. Quelques initiatives mériteraient pourtant d'être soutenues. Géomètre Sans Frontières porte l'ouverture dans son nom. Par ailleurs, récemment j'ai été contactée par la Compagnie Nationale du Rhône qui souhaitait faire don de ses "vieux" appareils (TC 1100). Cela m'a fait penser que de nombreux géomètres disposent d'appareils qui peuvent mener une retraite active sous d'autres latitudes (et même d'autres longitudes). Nous essaierons donc de monter une bourse d'appareils afin que les travaux pratiques soient possibles et que nous coopérons au développement du métier de géomètre dans des pays plus défavorisés.

Nous allons donc constituer une liste des bonnes volontés. Ecrivez-nous et faites-nous savoir ce que vous pouvez apporter à notre association et comment vous rêvez le géomètre dans l'humanaire. ●

## Contact

Claire GALPIN [claire.galpin@wanadoo.fr](mailto:claire.galpin@wanadoo.fr)



Fabrication de bornes à Gitega au Burundi.



Réserve de bornes au cadastre de Ambatolampy à Madagascar

■ Raymond D'HOLLANDER et Paul COURBON

La révolution amenée par le GPS a mis à mal l'astronomie de position, laquelle n'est plus enseignée à l'École Nationale des Sciences Géographiques ! On pourrait penser : "adieu, trigonométrie sphérique et triangle de position"... Pourtant, l'astronomie continue de passionner et le mouvement apparent du soleil autour de la terre rythme toujours nos activités. Il nous a paru intéressant de proposer aux lecteurs d'XYZ cinq récréations cosmographiques. Deux seront consacrées au solstice d'été, deux au solstice d'hiver, la cinquième aux deux équinoxes. On y étudiera la variation de l'azimut du soleil et de sa distance zénithale au cours de ces jours particuliers.

On apprend à l'école que le soleil se lève vers l'est et se couche vers l'ouest. En fait, il ne se lève rigoureusement à l'est (point cardinal Est) et ne se couche rigoureusement à l'ouest (point cardinal Ouest) que lors des deux équinoxes.

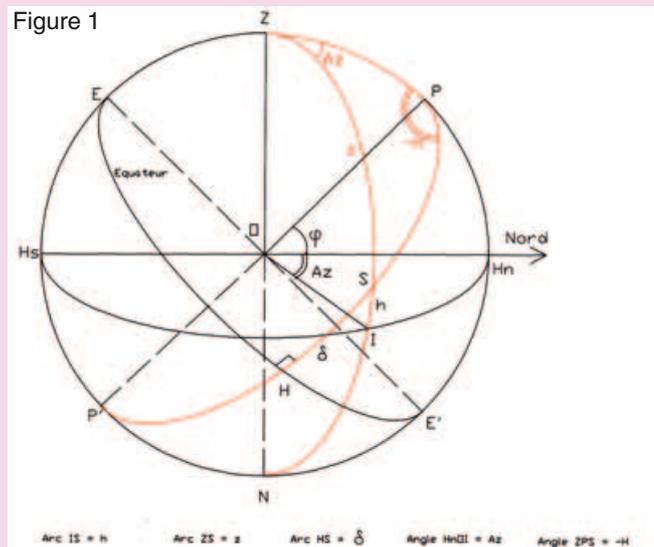
Dans l'hémisphère nord, l'azimut du soleil à son lever, égal à  $90^\circ$  le jour de l'équinoxe de printemps, diminue ensuite pour atteindre un minimum au solstice d'été. Ce minimum est très différent à Dunkerque et à Perpignan. Nous avons posé et résolu nos problèmes pour la latitude moyenne  $\varphi = 45^\circ$ . Mais, le lecteur pourra appliquer les procédés mis en œuvre pour la latitude de son choix. Il pourra aussi calculer les azimuts du lever et du coucher du soleil pour n'importe quel jour de l'année. Il faudra évidemment connaître la déclinaison du soleil. Faute de posséder une table du soleil, on peut maintenant l'obtenir par internet en tapant sur Google "déclinaison du soleil". On a alors accès à une "calculatrice pour astronome" qui donne, entre autres, la déclinaison du soleil avec deux décimales, ainsi que l'équation du temps (différence entre le temps solaire moyen utilisé par nos horloges et le temps solaire vrai défini ci-après).

## Préparation aux récréations

Nous serons amenés à utiliser un certain nombre de termes de cosmographie et d'astronomie de position. Pour simplifier la tâche des lecteurs qui n'ont pas suivi de cours d'astronomie ou l'ont fait il y a très longtemps, nous rappelons, ci-après, un certain nombre de définitions dont certaines sont matérialisées dans les figures qui suivent. Nous rappelons aussi les formules essentielles de trigonométrie sphérique à utiliser.

Certains problèmes posés peuvent être traités de deux manières : soit par résolution du triangle de position (voir figure 3) et utilisation de la trigonométrie sphérique, soit par la trigonométrie plane. Se rapporter alors aux analemmes d'Hipparque dans l'ouvrage de Raymond D'Hollander : "Sciences géographiques dans l'Antiquité", pp. 160 à 162.

Figure 1



## Quelques définitions relatives à la sphère céleste. (fig. 1 et 2)

**Equateur.** C'est le grand cercle EE' dont le plan est perpendiculaire à l'axe des pôles PP' autour duquel s'effectue le mouvement diurne. (fig. 1)

**Cercle horaire d'un astre.** C'est le grand cercle passant par l'astre S et l'axe des pôles P P' (fig. 1)

**Déclinaison d'un astre S.** C'est la longueur de l'arc  $\widehat{HS} = \delta$ , compté à partir de l'équateur.

**Cercle horizon.** C'est le grand cercle passant par HN et HS et parallèle au plan d'un liquide au repos au point d'observation. (fig. 1)

**Hauteur de l'astre S.** C'est l'arc  $\widehat{IS} = h$  compté à partir du cercle horizon. (fig. 1)

**Distance zénithale de l'astre S.** C'est l'arc  $\widehat{ZS} = z$ . On a :  $z+h=90^\circ$ . (fig. 1)

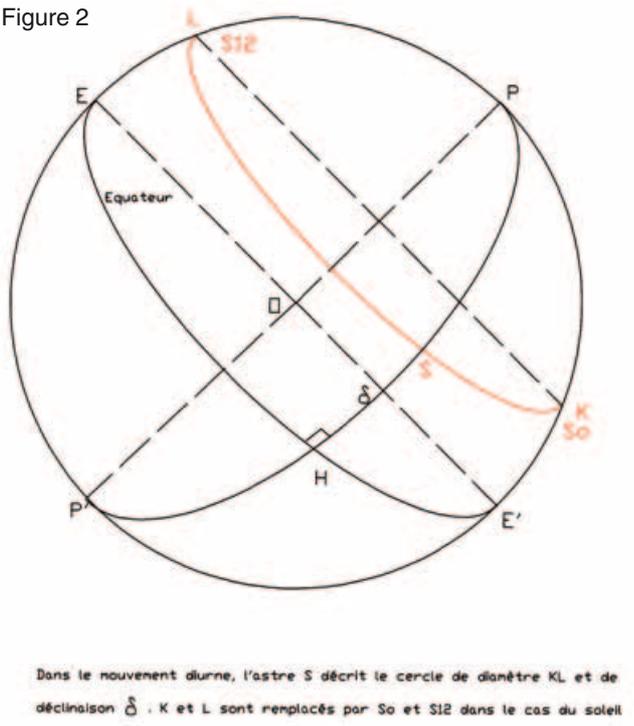
**Verticale, ZN.** Z étant le zénith et N le nadir, la verticale du lieu d'observation, ou direction du fil à plomb, est perpendiculaire au plan du cercle horizon. Le plan passant par ZN et l'astre S est le "vertical de l'astre". (fig. 1)

**Latitude d'un lieu.** C'est l'angle  $\varphi$  fait par l'axe des pôles PP' avec le cercle horizon. (fig. 1)

**Plan méridien du lieu.** C'est le plan passant par E, E', Z, N, P, P', H<sub>N</sub> et H<sub>S</sub>. (fig. 1)

**Angle horaire de l'astre S.** C'est l'angle que fait le plan du cercle horaire de l'astre avec le plan du méridien. Comme nous nous intéresserons au lever du soleil et aux positions qu'il a le matin, nous indiquons que pour un astre vers l'est, l'angle horaire est compté négativement : -H. (fig. 1)

Figure 2



**Azimet d'un astre S.** C'est l'angle que fait le plan vertical de l'astre avec le plan du méridien origine, il est compté à partir du nord géographique :  $Az = \widehat{PZS} = \widehat{H_N O I}$  ;  $O H_N$  est la direction du nord géographique. (fig. 1)

**Mouvement diurne.** (fig. 2) Dans le mouvement diurne, l'astre S, de déclinaison  $\delta$ , décrit un petit cercle de diamètre KL autour de l'axe des pôles. K est le passage au méridien inférieur, L est le passage au méridien supérieur ou "culmination".

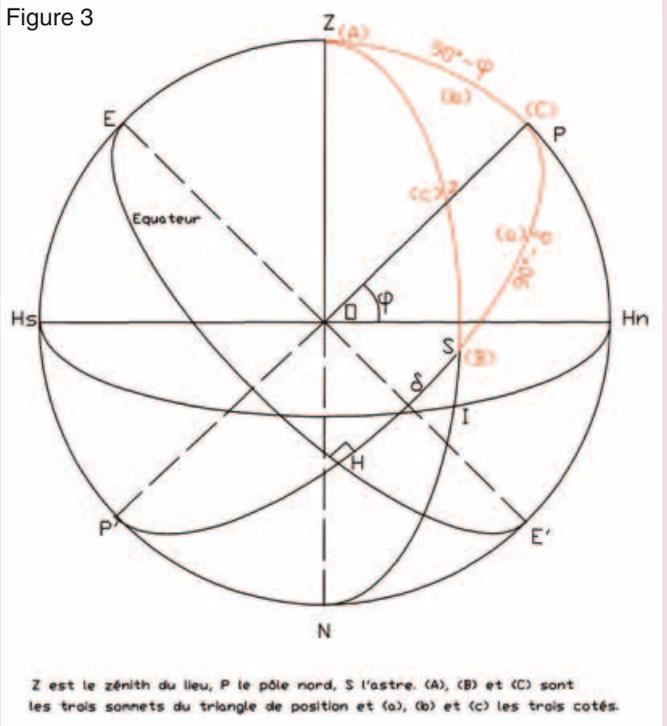
**L'heure solaire** est celle obtenue par un cadran solaire ou un astrolabe, différente de l'heure civile donnée par les fuseaux horaires. A Strasbourg et Brest, l'heure solaire est différente de près de 50 min, quand l'heure civile est la même. De plus, même au méridien de Greenwich, il peut y avoir une différence, qui peut atteindre en fonction de l'époque, autour de  $\pm 15$  minutes entre le temps solaire vrai donné par un cadran solaire et le temps solaire moyen donné par nos horloges (équation du temps).

Si l'astre S considéré est le soleil, nous remplacerons K par So parce qu'il est 0 h heure solaire au passage du soleil au méridien inférieur. Nous remplacerons aussi L par S12, parce que lors de la culmination du soleil, il est 12 heures solaires. (fig. 2)

**Triangle de position.** En astronomie, on ne considère en général qu'un triangle sphérique nommé triangle de position, tracé sur la sphère céleste locale. C'est le triangle PZS (fig. 3) dont les angles sont :

- En P, l'angle horaire qui, rappelons-le, est compté négativement -H pour un astre vers l'est.
- En Z l'azimet, compté à partir du nord géographique,  $Az = \widehat{PZS}$ .
- En S, l'angle à l'astre peu utilisé.

Figure 3



Plaçons A en Z, B en S, C en P et désignons par a b c les côtés respectivement opposés à A B C. On a :

$$a = \widehat{PS} = 90^\circ - \delta \quad (\delta \text{ déclinaison de l'astre})$$

$$b = \widehat{PZ} = 90^\circ - \varphi \quad (\varphi \text{ latitude du lieu})$$

$$c = \widehat{ZS} = z \quad (z \text{ distance zénithale de l'astre})$$

### Principales formules de trigonométrie sphérique

Formule reliant un angle et trois côtés, dite formule fondamentale :  $\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$   
Formule reliant trois angles et leurs côtés opposés, dite formule des sinus :

$$\frac{\sin A}{\sin a} = \frac{\sin B}{\sin b} = \frac{\sin C}{\sin c}$$

Formule reliant deux angles et deux côtés consécutifs : aCbA, dite en cotangente :

$$\cot a \sin b = \cos b \cos C + \sin C \cot A$$

## Récréation cosmographique n°1 Solstice d'été.

Nous allons poser le problème en considérant un point M situé à une latitude nord  $\varphi = 45^\circ$  et où l'on observe le soleil à son lever, le jour du solstice d'été. La déclinaison du soleil a alors pour valeur :  $\delta = 23^\circ 26'$  que l'on peut considérer comme constante le jour du solstice d'été. Nous négligerons la réfraction et ferons nos calculs en degré avec un résultat à deux décimales. Nous allons procéder par étapes et, pour le jour du solstice d'été au point M, vous pourrez retrouver comment :

- 1) Calculer l'angle horaire  $-H_L$  du lever du soleil par rapport au méridien du point M, soit par la trigonométrie sphérique en utilisant le triangle de position, soit par la trigonométrie plane selon l'analemme d'Hipparque.



- 2) Calculer l'heure solaire du lever et du coucher du soleil, desquelles on pourra déduire la durée du jour théorique.
- 3) Calculer l'azimut topographique  $A_L$  (à partir du Nord géographique) du soleil levant, soit par la résolution du triangle de position, soit par la trigonométrie plane.
- 4) De la même manière, ou par symétrie, calculer l'azimut du soleil à son coucher.
- 5) Azimut du soleil à divers moments de la journée du solstice d'été : il faudra pour cela établir la formule de trigonométrie sphérique donnant l'azimut du soleil en

fonction d'un angle horaire quelconque -  $H$  de la journée (formule en cotangente). Vérifier par cette formule, que pour  $-H = -H_L$  obtenu en 1, on retrouve bien  $A_L$  obtenu en 3.

- déduire de cette formule l'azimut du soleil 10 minutes, puis 4 heures après son lever.
- vérifier à partir de la formule la valeur de l'azimut du soleil au moment de sa culmination. Des deux déterminations obtenues, quelle est la bonne ?

Solution dans le prochain numéro de XYZ

## Solution de la récréation mathématique du n° 115 d'XYZ

$$\text{On a } \cos \frac{\varepsilon}{2} = \cos \left( \frac{A+B}{2} - \frac{\pi-C}{2} \right) = \cos \frac{A+B}{2} \sin \frac{C}{2} + \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{C}{2}$$

$$\text{D'après la 1}^{\text{re}} \text{ formule de Delambre } \cos \frac{A+B}{2} = \frac{\cos \frac{a+b}{2}}{\cos \frac{c}{2}} \sin \frac{C}{2}$$

$$\text{D'après la 2}^{\text{e}} \text{ formule de Delambre } \sin \frac{A+B}{2} = \frac{\cos \frac{a-b}{2}}{\cos \frac{c}{2}} \cos \frac{C}{2}$$

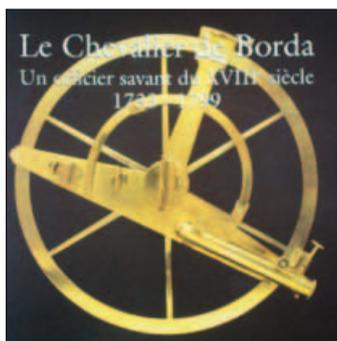
En remplaçant ces expressions par leurs valeurs ci-dessus dans la relation (1), il vient :

$$\cos \frac{\varepsilon}{2} = \frac{\cos \frac{a+b}{2} \sin^2 \frac{C}{2}}{\cos \frac{c}{2}} + \frac{\cos \frac{a-b}{2} \cos^2 \frac{C}{2}}{\cos \frac{c}{2}} = \frac{\cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} + \sin \frac{a}{2} \sin \frac{b}{2} \left( \cos^2 \frac{C}{2} - \sin^2 \frac{C}{2} \right)}{\cos \frac{c}{2}}$$

$$\cos \frac{\varepsilon}{2} = \frac{\cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} + \sin \frac{a}{2} \sin \frac{b}{2} \cos C}{\cos \frac{c}{2}} = \frac{\cos^2 \frac{a}{2} \cos^2 \frac{b}{2} + \frac{1}{4} \sin a \sin b \times \frac{\cos c - \cos a \cos b}{\sin a \sin b}}{\cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2}}$$

$$\cos \frac{\varepsilon}{2} = \frac{4 \cos^2 \frac{a}{2} \cos^2 \frac{b}{2} + \cos c - \cos a \cos b}{4 \cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2}} = \frac{(1 + \cos a)(1 + \cos b) + \cos c - \cos a \cos b}{4 \cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2}}$$

$$\cos \frac{\varepsilon}{2} = \frac{1 + \cos a + \cos b + \cos c}{4 \cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2}} \quad \text{c.q.f.d.}$$



## ■ Le Chevalier de Borda, un officier savant du XVIII<sup>e</sup> siècle - 1733-1799

Le catalogue de l'exposition "Le Chevalier de Borda, un officier savant du XVIII<sup>e</sup> siècle", présentée par le Musée de Borda à Dax, illustre la diversité des champs de recherche de cet homme de science. Les contributions des spécialistes de l'histoire des sciences et de l'histoire maritime, rassemblées dans cet ouvrage, nous font comprendre le rôle éminent joué par ce savant des lumières, qui à la fois marin, mathématicien, physicien, géodésien, cartographe, et astronome, exerça une influence déterminante dans les progrès de l'art de la navigation de son temps et contribua fortement – à travers l'établissement du système métrique – à l'unification des unités de mesure et à la création d'un code universel.

**Les auteurs :** François Bellec, Jean Raudier, Etienne Taillemite, Jean-Noël Turcat, Suzanne Débarbat, Jacques Gay, Jean Boudriot, Michel Vergé-Franceschi, Pierre Crépel, Olivier Chapuis et Henri-Claude Randier.

► Musée de Borda.  
[www.dax.fr](http://www.dax.fr)



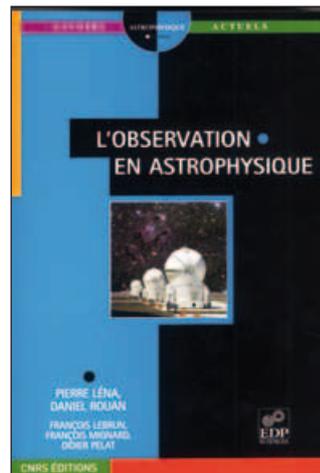
## ■ Nanterre et les Parisii Une capitale au temps des Gaulois ? Ouvrage collectif sous la direction de Antide Viand

Depuis une quinzaine d'années, une ambitieuse campagne de fouille est menée à Nanterre par le service d'archéologie départementale des Hauts-de-Seine. Cet ouvrage présente aujourd'hui la toute première synthèse des découvertes effectuées à cette occasion, et les confronte aux découvertes réalisées sur des sites voisins tels que Saint-Denis ou Bobigny. À la lumière de ces découvertes, le voile est levé sur l'agglomération gauloise de Nanterre et la tribu qui l'habitait : les Parisii. C'est à la découverte de leur vie quotidienne, de leur culture et de leur histoire qu'invite cet ouvrage, qui les suit du III<sup>e</sup> siècle au I<sup>er</sup> siècle avant J.-C. Une plongée fascinante dans l'Île-de-France du temps des Gaulois.

► Coédité avec le conseil général des Hauts-de-Seine  
128 pages - Prix : 19,50 €  
ISBN : 9782757201626

**Après déménagement et suite au reclassement de ses archives L'AFT dispose de plusieurs collections complètes de la revue XYZ du n°1 au n°115.**

**Les personnes intéressées sont invitées à se renseigner au 01 43 98 84 80 le mardi et le jeudi de 10 h à 12 h et de 14 h à 18 h**



## ■ L'Observation en astrophysique

**François Lebrun, Pierre Léna, François Mignard, Laurent Mugnier, Didier Pelat et Daniel Rouan**

Cet ouvrage présente une vue synthétique des outils et des méthodes de l'observation astronomique en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle.

Bâtie sur une série de cours de niveau doctoral, cette troisième édition est entièrement renouvelée et largement augmentée. En effet, en à peine plus d'une décennie, l'astronomie d'observation, appuyée sur des technologies nouvelles d'imagerie et de détection, a extraordinairement progressé : optique adaptative, interférométrie optique, accès au submillimétrique, découverte d'exoplanètes ou quête des neutrinos, pour ne citer que quelques exemples.

Pour explorer ces champs nouveaux apparaissent des télescopes et des missions spatiales d'une grande originalité. L'ouvrage développe également quelques traits du monde numérique : le traitement du signal, les bases de données et les observatoires virtuels.

► EDP SCIENCES  
Prix : 64 € - 758 pages  
ISBN : 978-2-86883-877-3

Dans une nouvelle présentation l'annuaire 2007-2008 de l'Union des ingénieurs ESGT est paru.

► Edition d'Île-de-France - EDIF  
Prix : 70 € - 200 pages  
[association@uiesgt.net](mailto:association@uiesgt.net)



L'AFT a rejoint le Comité français de cartographie au 107, rue La Boétie à Paris et signale volontiers la publication du n° 196 de sa revue de juin 2008.



## ■ La Carte du Ciel

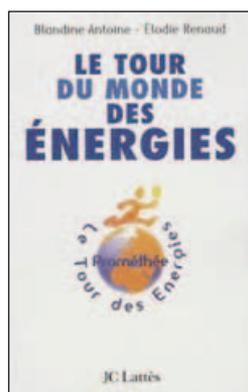
*Jérôme Lamy*

Le projet de réaliser en photo une carte de la totalité du ciel fut lancé en 1887 par Ernest Mouchez, alors directeur de l'Observatoire de Paris. L'objectif était de fournir un inventaire exhaustif des étoiles et de leur position, intention magnifique dont le but scientifique était toutefois, à l'époque, relativement vague. L'entreprise, ample et ambitieuse, mobilisa 18 observatoires à travers le monde, tous munis d'instruments semblables. Son importance et ses difficultés furent malheureusement sous-estimées, et le projet s'interrompit officiellement en 1970, sans avoir été achevé.

Cet ouvrage collectif analyse la genèse, le déploiement, l'abandon et les résurgences récentes de la Carte du Ciel. Au-delà de son échec avéré, la Carte du Ciel fut en effet le premier projet international astronomique de grande envergure, remarquable notamment par son organisation à l'échelle du globe. Bien plus que par son objet ou les techniques mobilisées pour sa réalisation, c'est par cette vision que la Carte du Ciel ouvre une nouvelle ère pour l'astronomie.

*Jérôme Lamy est post-doctorant CNRS à l'Université Toulouse II, après une thèse soutenue en 2004 à l'EHESS.*

- ▷ EDP SCIENCES, en collaboration avec l'Observatoire de Paris, collection Références Astronomiques  
Prix : 29 € - 250 pages  
ISBN : 978-2-7598-0057-5



## ■ Le tour du monde des énergies

*Blandine Antoine - Elodie Renaud*

De janvier à août 2007, Blandine Antoine et Elodie Renaud ont arpenté le monde à la découverte de solutions mises en œuvre pour penser l'énergie autrement. De la Norvège au Brésil, elles ont traversé 17 pays sur 4 continents afin de rencontrer pendant 7 mois plus de 200 entrepreneurs associatifs, industriels et institutionnels, tous promoteurs de solutions énergétiques pour demain. Des défis de l'électrification rurale au Maroc à l'installation de piles à combustible domestiques au Japon, en passant par l'opposition à la construction de barrages géants et la mise au point de cellules solaires plastiques : les situations varient, la créativité reste. De leurs rencontres, les deux voyageuses ont tiré un récit plein de vie décrivant les tenants technologiques, économiques et environnementaux de ces solutions énergétiques à des problèmes locaux.

- ▷ Editions J.-C. Lattès  
Prix : 19 € - 428 pages  
ISBN : 9782709630061

Jusqu'au lundi 20 octobre 2008, exposition au musée national de la Marine (Palais de Chaillot), à Paris Place du Trocadéro  
"Le mystère Lapérouse, enquête dans le Pacifique sud"  
Entrée 9 €



## ■ Droit du technicien géomètre-topographe (Edition 2008)

*Jean-Marc Desmedt*

Cet ouvrage, publié par l'Ecole Chez Soi, permet d'acquérir les connaissances nécessaires en droit français pour exercer une activité de géomètre-topographe. Une abondante iconographie illustre les textes à titre d'exemples. Qu'il s'agisse de droit civil, de droit de l'urbanisme ou de droit administratif, le technicien géomètre se doit d'acquérir une base juridique solide, tant pour mener à bien une délimitation, une surface Carrez, un règlement de copropriété... que pour informer un client, remplir un formulaire administratif ou compléter un dossier d'expertise pour le géomètre-expert... La culture juridique du droit "foncier" marque la différence entre un topographe et un géomètre-topographe ! L'auteur de cet ouvrage, Jean-Marc DESMEDT, géomètre-expert DPLG, est également professeur Agrégé de Génie Civil et professeur à l'Ecole Chez Soi.

- ▷ Ecole Chez Soi  
www.ecole-chez-soi.fr  
Prix : 77 € - 336 pages

Le numéro ISBN indiqué pour chaque ouvrage vous permet de le commander en librairie.

### REPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 116

ECOLE CHEZ SOI	4	GÉOMEDIA	4 <sup>e</sup> de couv	TOPCON	6
ESRI	2 <sup>e</sup> de couv	LEICA	2	TRIMBLE	1 et 3 <sup>e</sup> de couv
FARO	12	REIS STOLZEL	9		