

xvz

Éditée par l'
Association
Française de
Topographie
n°98



PHOTOGRAMMÉTRIE

page 35



GÉODÉSIE

page 61

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



**L'intérêt des logiciels de gestion
de projets en Génie Civil**

Directeur de la publication

André Bailly
Ingénieur Géomètre ETP

Directeur adjoint de la publication

Emmanuel Natchitz
Enseignant Chercheur ESTP

Rédaction et administration XYZ

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

Rédacteur en chef

Emmanuel Natchitz

Comité de Rédaction

Pierre Grussenmeyer
Maître de Conférences - INSA Strasbourg
Bertrand Ravez
Responsable de service Topographique
Bouygues TP

Responsable du site internet

Tania Neusch

Conseil d'orientation scientifique

Jean Bourgoin
Ingénieur Général Hydrographe ER
Robert Chevalier
Géomètre-Expert DPLG
Suzanne Débarbat
Astronome Observatoire de Paris
Raymond d'Hollander
Ingénieur Général Géographe - IGN
Jacques Riffault
Directeur Commercial
Robert Vincent
Ingénieur ECP
Dr Pascal Willis
Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

Publicité

Chantal Holdinet

Conception et maquette

Dorothée Picard

Abonnements

Evelyne Mesnès

Autre publication

L'annuaire de l'AFT

IMPRIMERIE MODERNE USHA

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

Dépôt légal

1^{er} trimestre 2004 ISSN 0290-9057
N° CPPAP : 0106 G 80866

Tirage de ce numéro : 1 600 ex

Abonnement annuel

France CEE : 73 €
Étranger (avion, frais compris) : 76 €
Les règlements payés par chèques
payables sur une banque située hors de
France doivent être majorés de 10 €
le numéro : 20 €

Le bulletin d'adhésion est en p. 87

Membre du SPCS Syndicat de la Presse
Culturelle et Scientifique

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

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres) 

2 avenue Pasteur - 94165 Saint Mandé cedex - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 43 74 72 80

E-mail : info@aftopo.org • Site internet : <http://www.aftopo.org>

■ Editorial 5

■ Info-Topo

> Les informations de la profession 7

■ Manifestation

> Seconde Conférence Régionale pour l'Afrique
et le Moyen Orient de la FIG "Interaction
des Espaces Urbains et Ruraux pour
un Environnement Durable" 25
> Forum de Photogrammétrie 2004 27

■ Génie civil



> L'intérêt des logiciels de gestion
de projets en Génie Civil
Denis LASSALLE 29

■ Métrologie

> Intercomparaison des méthodes
de mesure dans le domaine de la Métrologie
Tridimensionnelle par Procédés Optiques
(MTPO)
Alain MARTIN-RABAUD 33

■ Photogrammétrie

> Photogrammétrie et PVA ULM
Gabriel DUCANDAS 35

■ GPS

> Trajectoire d'avion par GPS
pour la gravimétrie aéroportée
F. DUQUENNE - A.V. OLESEN - J. CALI 39

■ SIG

> Projet de développement du SIG du CERN.
Application à la gestion du réseau de fibres
optiques.
C. CARNEIRO - L. GONÇALVES
B. GUYOT - M. MAYOUD 45

■ Hydrographie

> Synthèse sur la concordance des références
altimétriques en Baie du Mont-Saint-Michel
Christophe MARGUERIT 53

■ Topographie

> Quelques réflexions sur la réfraction
d'un rayon lumineux dans l'air
Robert VINCENT 57

■ Géodésie

> Les premières déterminations d'altitudes
des sommets des Pyrénées
Raymond D'HOLLANDER 61

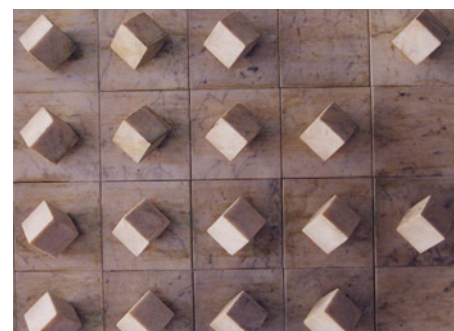
■ Histoire

> Mesure et proportion dans la loge
de la Signoria à Florence
Giampiero MELE 70

■ GSF

> De l'eau pour Ivondrona
Florent DESSENS 81

■ Art et Géométrie



> Luis Tomasello : le carré dans le marbre
Jean-Pierre MAILLARD 78

■ Livres 84

Pour la recherche de nos annonceurs
consulter la page 85.

La construction européenne est en marche, y compris en topographie !

L'Europe accueillera de nouveaux partenaires dès le 1^{er} mai prochain. Les règles communautaires seront établies dans l'intérêt général. Chaque pays possède ses réglementations, ses traditions de travail et son propre savoir faire. L'union de toutes ces règles se fera dans le respect de l'intérêt commun et non des cas particuliers. Les topographes ont eux aussi la possibilité d'exprimer et d'expliquer leurs spécificités au sein de diverses commissions et forums internationaux, à condition d'y être présents !

La seconde assemblée générale du réseau européen EEGECS (European Education in Geodetic Engineering, Cartography and Surveying) s'est tenue les 19 et 20 février dernier à l'Université de Géodésie, de Cartographie et de Topographie (ETSIGCT) de Valence en Espagne. Ce réseau thématique a pour mission de proposer un programme commun d'enseignement et de recherche fondé sur l'analyse des offres de formations existantes et des besoins des entreprises privées ou publiques à travers l'Europe. A terme il permettra de définir les nouvelles règles de reconnaissance professionnelle des diplômes européens.

La France n'est que partiellement représentée dans ce réseau. La représentation des institutions françaises s'est limitée à trois organismes de formation (ENSG, ESTP et INSA de Strasbourg). L'AFT, membre de ce réseau depuis sa création (cf. XYZ N° 91 et 94) présentera un compte rendu de l'avancement des discussions des différents groupes de travail dans le numéro d'été d'XYZ. Écoles, organismes professionnels, institutions privées et publiques, entreprises et cabinets de géomètres devraient s'investir pour participer activement à ces changements. Comprendre les besoins, les attentes des autres, identifier les points forts et les points faibles de notre pays sont les garants d'une adaptation réussie.

Depuis sa création il y a 25 ans, l'AFT cherche à rassembler les acteurs des sciences géographiques en France et dans les pays francophones. Ces actions ne peuvent se faire qu'avec une plus forte implication de ses membres. C'est pourquoi vous avez été sollicités récemment pour donner votre point de vue sur la revue XYZ ou encore sur l'adaptation de l'AFT au nouveau terme de "Géomatique".

Ces questionnaires vous ont été envoyés avec l'appel de cotisation de 2004.

Nous attendons vos remarques et suggestions, et vous invitons à distribuer notre revue dans votre entourage pour mieux faire connaître notre Association.

Bougeons avec l'Europe des Topographes !

Emmanuel NATCHITZ et Pierre GRUSSENMEYER

L'intérêt des logiciels de gestion de projets en Génie Civil

■ Denis LASSALLE



La culture Gestion de Projet commence à se diffuser au sein des entreprises françaises, au-delà des grands groupes appelés à gérer des projets très complexes et dont les enjeux aussi bien techniques qu'économiques sont considérables.

Cet article est un témoignage de l'utilisation faite par le Groupe EIFFAGE des solutions de gestion de projets de PrimaFrance Systems dans le cadre de très grandes opérations tel le célèbre Viaduc de Millau (Aveyron), le plus haut pont du monde avec 343 mètres au sommet des pylônes dominant le Tarn.

Le Groupe EIFFAGE

Le Groupe EIFFAGE est l'un des principaux groupes français et européens dans le domaine de la construction, des grandes infrastructures et des concessions. Historiquement, il est issu de l'alliance en 1992 entre les groupes Fougerolle et SAE. Aujourd'hui, sa structure comprend la Holding, EIFFAGE S.A., et quatre grandes branches d'activités :

- EIFFAGE Construction, en charge des activités de Bâtiment, d'Immobilier, de Génie Civil et de Terrassement,

- FORCLUM, spécialisée dans tous les secteurs de l'électricité,
- APPIA, spécialiste des travaux routiers,
- EIFFEL, un leader en matière de construction métallique,
- enfin, une Branche Concessions.

Le Groupe EIFFAGE emploie aujourd'hui plus de 46 000 personnes et réalise un chiffre d'affaires d'environ 7 milliards d'euros. Sa bonne santé financière lui permet une politique active de croissance externe dans ses principaux métiers, notamment en Europe.

En terme d'actionnariat, l'une de ses caractéristiques majeures est la forte proportion du capital détenue par ses salariés, puisque celle-ci représente 30 % des droits de vote, l'autre actionnaire majeur étant BNP Paribas. Eiffage est amené sur certains chantiers à marier les compétences de plusieurs de ses filiales et branches d'activités, comme c'est d'ailleurs le cas pour le Viaduc de Millau. Eiffage est le concessionnaire du viaduc : il le construit, finance l'investissement (320 M €) sur ses fonds propres et en assure l'exploitation pendant 75 ans. La construction est effectuée par EIFFAGETP pour les appuis en Béton et par EIFFEL pour le tablier métallique.

BTP et logiciels de gestion de projets

Dans l'activité Bâtiment-Travaux Publics, la culture Gestion de Projet est assez naturelle sur toutes les grandes

■ ■ ■ opérations, chaque ouvrage étant un prototype mobilisant une longue chaîne d'acteurs sous la houlette d'une grande entreprise et de spécialistes de la maîtrise d'œuvre.

Cependant l'utilisation d'un logiciel prenant en charge cette fonction n'est jamais acquise d'avance. Il appartient aux responsables du projet de faire adopter le même type de solution par l'ensemble des acteurs internes et externes, et ce, projet par projet. Il faut donc une impulsion vigoureuse de l'intervenant principal pour que les dizaines d'autres parties prenantes adhèrent véritablement au dispositif.

Au sein du Groupe EIFFAGE, d'importants chantiers bénéficient des apports de l'utilisation de logiciels avancés de gestion de projets. Selon le chantier, ce sont certaines fonctionnalités du logiciel qui seront exploitées ou non, mais les solutions que nous avons retenues, celles de PrimaFrance Systems, sont très complètes et nous permettent de couvrir l'ensemble de nos besoins. Nous utilisons ces outils de très longue date et en avons une excellente maîtrise.

Le choix initial a été dicté d'une part par l'éventail de solutions et de fonctions couvertes, d'autre part par la qualité du support que nous avons reçu des équipes de PrimaFrance.

Examinons maintenant plusieurs exemples d'utilisation des solutions

PrimaFrance sur nos différents chantiers. Les utilisations sont toutes différentes afin de répondre aux besoins spécifiques de chaque projet, ce qui est extrêmement intéressant pour notre activité. Commençons par le héros du jour : le Viaduc de Millau.

Le Viaduc de Millau

Notre Groupe a remporté le concours pour l'octroi de la concession, dont le contrat a été approuvé par décret public au J.O. le 10/10/2001. Il y a maintenant trois ans et le chantier est aujourd'hui en pleine charge. La livraison de cet ouvrage est prévue pour le début de l'année 2005. L'autoroute A75, passant par Clermont-Ferrand, Millau et Béziers, sera alors l'itinéraire Nord-Sud le plus fluide et le moins coûteux pour traverser l'Hexagone.

Le viaduc couvrira en huit travées les 2 460 mètres séparant les culées nord et sud. Côté sud, le tablier métallique, par lançages successifs depuis la culée, a atteint début juillet 2003 une première pile et progresse désormais vers la suivante. Côté nord, le premier lançage a eu lieu au début de l'automne 2003. Les deux parties du tablier se rejoindront exactement au dessus du Tarn, à mi-chemin entre les piles P3 et P2. La pile P2 détiendra, avec 245 m, le record du monde de hauteur pour une pile. Les

dimensions exceptionnelles de l'ouvrage et le cahier des charges auquel il doit répondre (durée de vie d'au moins 120 ans, résistance au vent et au séisme, sécurité des usagers...) ne laissent pas de droit à l'erreur. Les travaux mobilisent 500 personnes sur le site et des dizaines de prestataires, fournisseurs et sous-traitants qui doivent être parfaitement coordonnés, quels que soient les aléas climatiques, logistiques ou techniques.

Outre le viaduc lui-même, nous construisons également une barrière de péage qui intègre le centre d'exploitation et de maintenance de l'ouvrage. Située à environ six kilomètres au nord en direction de Clermont-Ferrand, cette barrière de péage sera couverte par un auvent en béton à très haute performance.

Sur ce chantier du Viaduc de Millau, le logiciel P3 (Primavera Project Planner version 3.1) de PrimaFrance est utilisé principalement pour les fonctionnalités de Planification qui sont ici extrêmement complexes. Le volet Gestion de Ressources est également employé mais en moindre proportion que le volet planification.

Cette utilisation nous garantit une gestion très rigoureuse des travaux dans le temps et une convergence des différents intervenants. Le respect des plannings a une importance capitale pour un projet mobilisant autant d'intervenants ■ ■ ■



AVIS DE L'EXPERT : Jean DELEERSNYDER, Responsable Consulting- PrimaFrance Systems

La gestion de projet dans les domaines des travaux publics et du génie civil.

La gestion de projet est une science qui, combinée à l'art du pilotage de projet, constitue le management de projet. Elle vise à recueillir, organiser et véhiculer l'information relative à un projet, en vue de prendre les décisions qui permettront de tenir les objectifs du projet et satisfaire les parties prenantes. Sa mise en œuvre est facilement accessible à tous les acteurs de ces secteurs.

La gestion de projet dispose à l'issue d'un demi-siècle de formalisation d'un référentiel méthodologique abouti et d'outils associés éprouvés.

Pyramides, Tour Eiffel, à toutes les époques il est aisé de trouver des exemples de moyens mis en œuvre de façon spécifique, en vue de la réalisation d'un objectif unique, c'est à dire répondant à une logique de projet, bien avant que cette notion existe. Ainsi des savoirs-faire spécifiques en terme d'outils et de méthodes se sont accumulés de façon indépendante dans les organisations dont le cœur d'activité est constitué de projets : les firmes d'ingénierie, les sociétés de grands travaux, les institutions spécialisées dans la conduite du développement socio-économique et les entreprises de hautes technologies. La multiplication de la taille et de la complexité des projets a conduit à une réflexion sur la systématisation des méthodes permettant d'améliorer la probabilité de réussite des projets. Le Project Management Institute (PMI), réunissant les professionnels de la gestion de projet, est créé en 1969 et devient un acteur majeur de cette démarche. Ces travaux aboutirent à l'élaboration d'un corps de connaissances (Body of Knowledge) de la gestion de projet publié en 1983. Il constitue une démarche formalisée de gestion indépendante de la nature des projets. Ces pratiques traditionnelles et largement appliquées constituent les bases de la gestion de projet.

La version 2000 de ce guide le "PMBOK" est un référentiel mondial, devenu un standard ANSI (ANSI/PMI 99-001-2000) et ISO 10 000. Le management de projet y est décrit sous forme de processus relevant de 9 domaines : contenu, délais, coûts, qualité (objectifs du projet), RH, communication, risques, approvisionnement (moyens mis en œuvre), et intégration (coordination de tous les processus). Ces processus sont organisés autour d'une démarche itérative : initialisation, planification, réalisation & contrôle, clôture.

Ainsi le "modèle standard" de la gestion de projet est opérationnel et éprouvé.

Les méthodes existantes sont pertinentes pour les projets de travaux publics et de génie civil.

Les bénéfices concurrentiels potentiels ont conduit tous les secteurs industriels à mettre en œuvre des principes de gestion de projet. L'industrie de grande série a trouvé dans la gestion par projet l'agilité nécessaire pour faire face aux contraintes de rapidité de développement et de flexibilité exigées induites par l'évolutivité accrue de la concurrence.

La diversité des natures de projets menés selon cette méthode a permis de cerner les limites de l'universalité de ce modèle standard. Ainsi de nouvelles pratiques sont expérimentées visant à favoriser la créativité en mettant l'accent sur la responsabilité et l'autonomie des individus ou encore en mettant en œuvre un management de portefeuilles de projets, permettant de globaliser le risque et garantir l'alignement des projets avec les objectifs stratégiques de l'entreprise. Or, quelle que soit l'ambition et la difficulté technique des projets de travaux publics et de génie civil, leur objectif peut être décrit. Les spécifications et les responsabilités des différents acteurs sont d'ailleurs fortement contractualisées. Le modèle standard est donc applicable et opérationnel pour ces domaines, ce qui est naturel dans la mesure où ils ont fortement contribué à le définir.

Dans ces domaines, le niveau de maturité en gestion de projet n'est pas uniforme dans toutes les entreprises.

Toutes les entreprises menant des grands projets se sont approprié la culture gestion de projet. Cependant, la diffusion de cette culture rencontre naturellement quelques difficultés. En voici quelques exemples : l'organisation relative à la gestion de projet est mise en place projet par projet dans le cadre d'exigences définies par le donneur d'ordre. Les méthodes de travail peuvent donc différer pour une entreprise en fonction de chaque client. Parfois le projet est mené par un consortium d'entreprises disposant de méthodes différentes. La nature unique et limitée dans le temps du projet rend difficile la capitalisation et l'optimisation des pratiques pour une entreprise donnée.

Mettre en œuvre une gestion de projet contribuant à la performance de son management est simple et accessible à toutes les entreprises : la compétence en gestion de projet est simple à acquérir, le référentiel de connaissances étant partagé par tous les professionnels de ce domaine, elle est largement disponible.

Les "bonnes pratiques" étant formalisées,

il reste à les faire porter par des outils communs à l'ensemble des projets. Chaque projet bénéficie alors de l'expérience capitalisée de l'entreprise, sans réinventer la poudre. Les technologies actuelles permettent une réduction significative des opérations manuelles de saisie et de traitement des données projet. Le temps passé imputable à la gestion de projet doit essentiellement consister en l'analyse des indicateurs et non leur construction. En cela, le choix des outils du système d'information doit être réalisé avec une vision globale. On veillera notamment à la prise en compte native des bonnes pratiques de la profession par les outils retenus.

Enfin, on constituera un "Project Office", ou un réseau animé par des spécialistes afin de former et supporter les opérationnels, de capitaliser l'expérience, améliorer le processus et communiquer, communiquer, communiquer...

GLOSSAIRE DE LA GESTION DE PROJET

Projet : une démarche spécifique qui permet de structurer méthodiquement et progressivement une réalité à venir...Un projet est défini et mis en œuvre pour élaborer une réponse à un besoin d'un utilisateur, d'un client ou d'une clientèle et implique un objectif et des actions à entreprendre avec des ressources données (AFNOR).

Management de projet : processus de planification, exécution et maîtrise permettant de garantir la réalisation des objectifs du projet.

Gestion de projet : mise en œuvre des techniques et des méthodes de recueil, traitement, et communication des données du projet.

Pilotage de projet : prise de décision relative au projet par le chef de projet en vue de tenir les objectifs.

Planification : processus d'élaboration du référentiel auquel sera comparé la réalisation du projet. Elle constitue une modélisation de l'ensemble des activités prévues (AFITEP).

Maîtrise : suivi, identification des écarts aux prévisions et planification des actions correctives.

Valeur acquise : technique de suivi synthétisant l'avancement temporel et budgétaire du projet, basée sur la valorisation budgétaire du travail réalisé à date.

Agilité : performance de l'organisation obtenue par sa réactivité au durcissement de l'environnement concurrentiel, basée sur l'optimisation de ses processus opérationnels.

■ ■ ■ et de moyens. C'est également un élément qui compte dans la communication auprès du public et des nombreux médias qui suivent de très près l'avancement des travaux. Le chantier est en effet aussi visité qu'un monument, puisque 150 000 personnes y sont venues depuis l'été 2002. Un grand pavillon d'accueil et des guides permettent d'être en prise directe avec l'actualité de ce chantier.

Le site web dédié à l'ouvrage (www.viaducdemillau.eiffage.com) est également un outil d'information très consulté.

Autoroute au Portugal Nord

Il s'agit d'un projet moins médiatique que le Viaduc de Millau, bien que plus important en termes financiers (500 millions d'Euros), qui mériterait de s'attarder plus longtemps, mais notre projet vedette dans le cadre de cet article est bien entendu le Viaduc de Millau.

Nous construisons actuellement 155 km d'autoroute entre Viseu et Chaves, dont 120 km en milieu de "semi-montagne". Cette autoroute concédée a la particularité d'être à péage virtuel, l'Etat portugais réglant le concessionnaire en lieu et place des usagers. Ce projet comprend la construction d'environ 30 viaducs sur cet itinéraire et de très importants terrassements.

Ici aussi, nous utilisons le logiciel P3 de

PrimaFrance. Ses usages sont les suivants : gestion de la planification, gestion des ressources, contrôle des produits mérités, qui nous permet d'établir les poids financiers des travaux déjà réalisés dans le projet et la gestion des dépenses.

TGV Est

Dans ce vaste projet ferroviaire reliant par TGV Paris à Strasbourg, nous intervenons sur plusieurs lots très importants et nous utilisons également P3. Les solutions PrimaFrance sont par ailleurs utilisées sur ce projet par la SNCF.

Omniparc

Il s'agit ici du nom d'une filiale du groupe EIFFAGE récemment créée, et spécialisée dans la conception, la construction et l'exploitation de parcs de stationnement. Omniparc utilise quant à elle P3e (Primavera Project Planner pour l'Entreprise), le plus récent logiciel proposé par PrimaFrance, dans un contexte multi projets particulièrement intéressant.

Il s'agit ici d'avoir une vision globale de l'ensemble des projets afin de générer des tableaux de bord synthétisant l'activité.

Grâce aux fonctionnalités de P3e, nous évitons l'obligation d'un logiciel résidant sur chaque site. Nous avons donc mis en oeuvre une base de données



commune gérée à notre siège sur un serveur. Les responsables peuvent ainsi travailler en temps réel sur chaque affaire. Cette simultanéité du travail ainsi que la bonne gestion par P3e de l'intégrité des données est pour nous un avantage décisif.

Conclusion

Ce survol de différentes applications de gestion de projets montre les nombreux avantages liés à l'utilisation de logiciels avancés : cohérence des informations, gestion de la planification, gestion des coûts et des dépenses, gestion des ressources, voire même analyse des risques : autant de fonctions indispensables d'une part à la bonne conduite de projets complexes et d'autre part à la gestion saine et rigoureuse de l'entreprise. Le Viaduc de Millau en est l'exemple frappant. ●

Tous les noms de produits et sociétés cités ci-dessus sont des marques et des marques déposées de leurs propriétaires respectifs.

Denis LASSALLE

Responsable du projet Barrière de Péage au sein de la Maîtrise d'ouvrage du Viaduc



Intercomparaison des méthodes de mesure dans le domaine de la **Métrologie Tridimensionnelle** par **Procédés Optiques (MTPO)**

■ Alain MARTIN-RABAUD

Le groupe de travail MTPO du Collège Français de Métrologie propose aux utilisateurs de moyens de mesure 3D par procédés optiques de participer à une intercomparaison, de manière à obtenir une meilleure maîtrise des paramètres influents dans l'évaluation de l'incertitude de mesure de tels procédés. Cette opération consiste à réaliser des mesures sur un même objet, un tétraèdre de 2 m d'arête, puis à comparer les résultats obtenus par les différents participants. Elle donnera lieu à une présentation des résultats et alimentera le travail du groupe dans l'élaboration d'un guide des bonnes pratiques des méthodes concernées.

La mise en œuvre de mesure par procédés optiques dans le domaine de la métrologie dimensionnelle est de plus en plus fréquente, particulièrement dans l'industrie. Le groupe de travail MTPO du Collège Français de Métrologie a été créé en 1992 à l'initiative des différents utilisateurs de ces techniques. Les participants de ce groupe sont principalement préoccupés par l'assurance qualité de la mesure, du fait de son exigence contractuelle et de sa nécessité technique : c'est ce qui est ressorti d'une enquête effectuée par le groupe MTPO. L'opération de mesurage étant généralement destinée à prouver la conformité d'un produit à sa spécification, la connaissance du niveau d'incertitude et les conditions de traçabilité deviennent indispensables. Compte tenu de la complexité des tech-

niques mises en œuvre (une mesure 3D n'est pas obtenue directement par un seul capteur, mais par un ensemble de capteurs disposés dans un appareil de mesure à la géométrie particulièrement complexe), il n'existe pas de principe validé et reconnu tant au niveau national qu'international pour estimer ces incertitudes et garantir la traçabilité. En effet, les opérations de mesurage par procédés optiques sont liées à un grand nombre de paramètres plus ou moins bien identifiés ou identifiables par les utilisateurs. Pour identifier et quantifier ces différents paramètres, le groupe de travail a déjà proposé en 1997 une approche globale qui reposait sur une intercomparaison de l'ensemble des éléments qui contribuent à la mesure : moyen, méthode, main d'œuvre, matériel, milieu. Il ne s'agit pas de comparer les instruments de mesure, mais l'ensemble de la chaîne d'un travail de métrologie, intégrant dans cet ensemble la compréhension du cahier des charges, les conditions de mesure, l'analyse des résultats et leur interprétation.

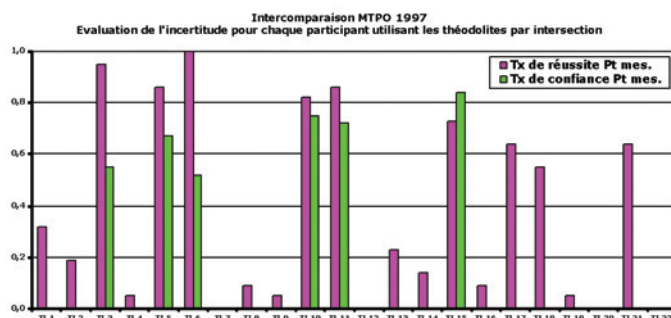
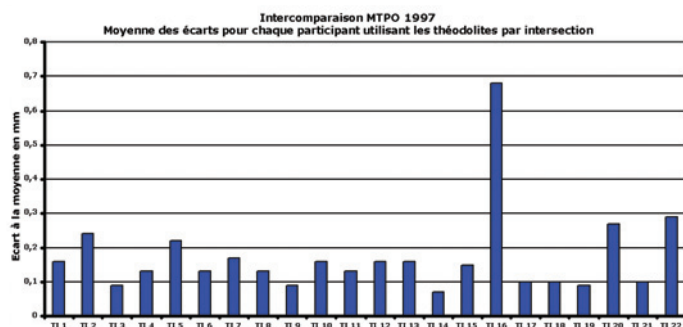
L'opération consistait à mesurer un tétraèdre, de deux mètres d'arête et comportant des points caractéristiques à identifier (le site www.metride.fr/mtpo/intercomp/intercomparaison.html).

Les techniques utilisées alors étaient principalement les techniques de mesure de triangulation par théodolite, par photogrammétrie sur support argentique ou avec caméra numérique. Cette opération a permis de quantifier, en première approche, l'ordre de grandeur des incertitudes de mesures obtenues à l'aide de ces techniques et de mettre en évidence la difficulté des utilisateurs à maîtriser l'évaluation des incertitudes de mesure.

Depuis 1997, les techniques de mesure ont évolué par l'arrivée des lasers de poursuite, des scanners lasers, l'évolution de la photogrammétrie... De ce fait, nous proposons de reprendre cette intercomparaison dans un esprit légèrement différent. Trois étapes sont proposées :

1. Mesure en laboratoire (LNE Nîmes) : le tétraèdre est disposé dans une position





■ ■ ■ stable sans être déplacé, ni démonté ; de ce fait, ses caractéristiques resteront inchangées pendant la durée de cette étape – le niveau d'incertitude des moyens de mesure actuels impose d'avoir une stabilité bien meilleure que celle dont nous avons besoin lors de la précédente intercomparaison.

2. Mesure sur le site du participant : les conditions de laboratoire n'étaient pas celles que rencontrent les utilisateurs de ces moyens de mesure, il nous a semblé important de proposer une intercomparaison dans les conditions de mesure habituelles de chaque participant, sachant que le tétraèdre ne sera pas exactement le même d'un site à l'autre (l'intercomparaison précédente nous a permis de vérifier qu'il restait fidèle à 0,05 mm près - à un écart-type)

3. Mesure en dynamique sur un système de ball-bar (sur les sites du LNE à Nîmes ou à Trappes) : certains moyens intègrent maintenant les mesures en dynamique et il est donc nécessaire de réaliser une intercomparaison dans ces conditions. Les techniques concernées par cette intercomparaison seront principale-

ment les suivantes :

- Les lasers de poursuite
- Les théodolites par intersection
- Les tachéomètres
- La photogrammétrie argentique et numérique
- Les scanners laser
- Les méthodes à lumière structurée

Le tétraèdre a été modifié en intégrant un radôme, surface gauche décrite par une définition numérique.

L'analyse des résultats sera effectuée de manière à respecter l'anonymat de chaque participant. Elle donnera lieu à une journée de présentation des conclusions. Chaque participant pourra ainsi se situer par rapport à l'ensemble de la profession, mieux cerner les paramètres d'influence de son processus de mesure et améliorer de ce fait ses connaissances et sa pratique.

Elle nous permettra aussi d'alimenter notre analyse des bonnes pratiques dans ce domaine, travail que nous avons commencé à réaliser et qui pourra déboucher sur des recommandations publiées par l'intermédiaire du Collège Français de Métrologie.

Pour participer à l'intercomparaison, vous pouvez vous inscrire en remplissant le coupon joint ci-dessous ou en écrivant aux adresses indiquées.

Le montant de la participation est fixée à 100,00 € HT par participant et 50,00 € HT par système utilisé (par exemple, une entreprise qui décide de participer en utilisant 2 lasers de poursuite et 1 scanner laser s'acquittera de la somme de $100 + 3 \times 50$, soit 250 €). Dans la phase de mesure sur le site de chaque participant (étape 2), le transport du tétraèdre vers le site suivant est à la charge du participant. Pour en savoir plus, consultez le site www.metride.fr/mtpo/: vous y trouverez en particulier la spécification de mesure proposée. ●

Contacts techniques

Alain MARTIN-RABAUD, METRIDE

Tél. : 04 72 08 77 75

Email : alain.martin-rabaud@metride.fr

Georges-Pierre VAILLEAU, LNE

Tel : 01 40 43 37 77

Email : georges.vailleau@lne.fr

BULLETIN D'INSCRIPTION A L'INTERCOMPARAISON

A renvoyer à Sandrine GAZAL, secrétariat du Collège Français de Métrologie Maison de l'Entreprise
429 rue de l'Industrie - CS 70 003 - 34078 Montpellier Cedex 3 - France
Tel : 04 67 06 20 36 - Fax : 04 67 06 20 35 Email : sandrine.gazal@wanadoo.fr

Nom : _____

Prénom : _____

Société et service : _____

Adresse : _____

Tél. : _____ Fax : _____

Email : _____

Vous souhaitez participer à l'intercomparaison :

Avec quels moyens de mesure ? (indiquez le nombre de système pour chaque technique)

☐ Laser de poursuite

☐ Tachéomètre

☐ Photogrammétrie

☐ Scanner laser

☐ Lumière structurée

☐ Autre _____

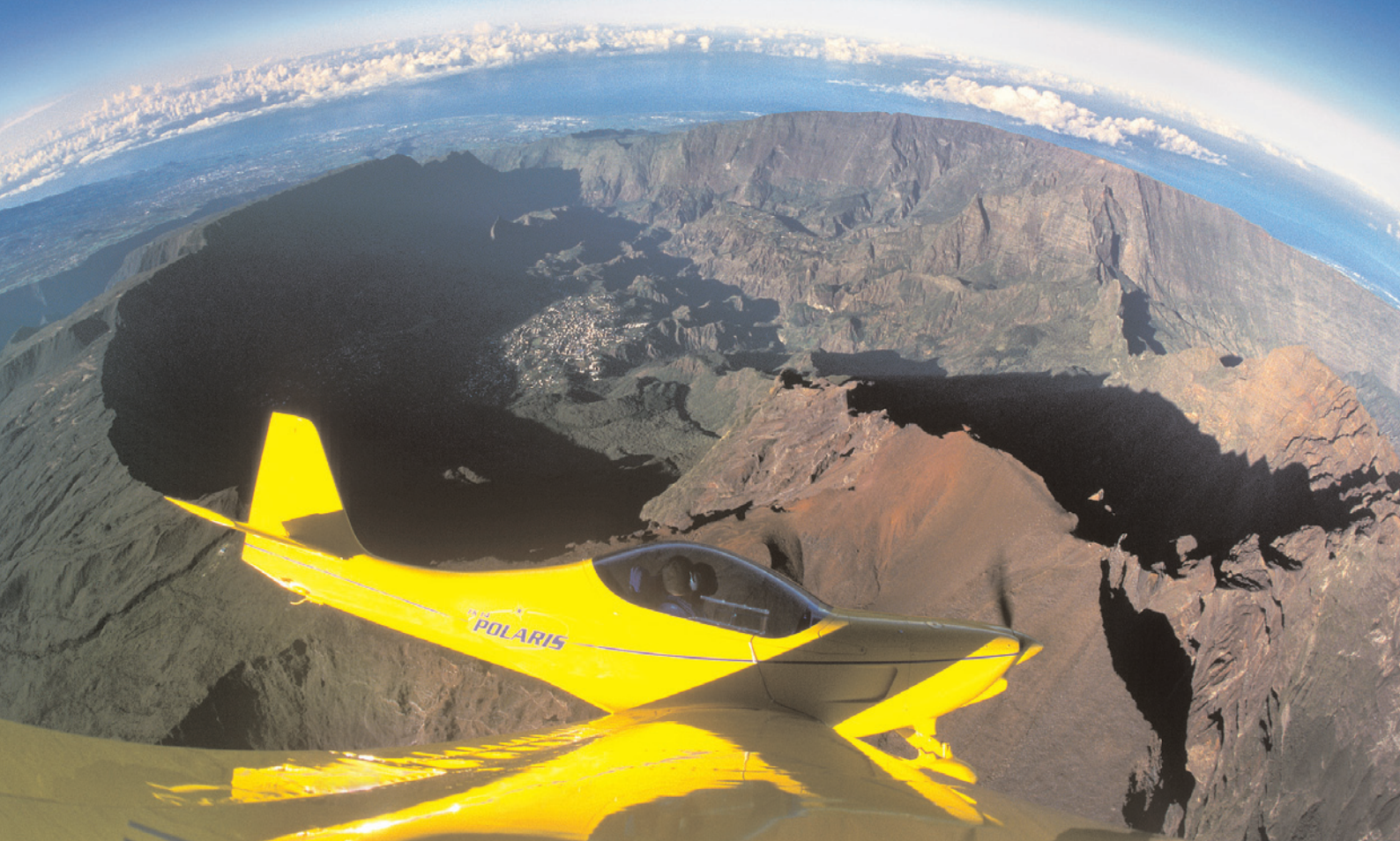
A quelles étapes de l'intercomparaison ?

☐ Mesures statiques au LNE Sud (Nîmes) ☐ Mesures statiques dans votre atelier

☐ Mesures dynamiques au LNE Sud (Nîmes) ☐ Mesures dynamiques au LNE (Trappes)

ABSTRACT

The MTPO workshop of the French College of Metrology proposes to users of measurement 3d by optical processes equipments to participate in an intercomparison, so as to obtain a better control of the main influential parameters in the evaluation of the uncertainty of measurement of such processes. This operation consists to perform measurements on the same object, a tetrahedron of 2 m edge, then to compare the results obtained by the several participants. It will give place to a presentation of the results and will give data to the workshop for preparing a guide of the good practices of the methods concerned



© Stéphane DUCANDAS

Photogrammétrie et PVA ULM

■ Gabriel DUCANDAS

Les traditionalistes esquissent un sourire hypocrite et les détracteurs s'en donnent à cœur joie. Et pourtant la photogrammétrie précise à partir de prises de vues ULM ça fonctionne ! Merci à ceux qui m'ont fait confiance, ils se reconnaîtront.

Mes premiers pas en photogrammétrie remontent il y a trente deux ans à Vanuatu, anciennement Nouvelles Hébrides, où, avec des Ingénieurs de l'IGN et la RAF, Royal Air Force pour la prise de vue, nous établissions la cartographie de l'archipel. Après d'autres missions épisodiques à travers le monde, je me suis installé à la Réunion depuis plus de dix ans où j'ai créé GUID Océan Indien, avec actuellement deux jeunes associés Géomètres Experts.

Passionné d'imagerie numérique et de sports extrêmes, je me suis entouré de spécialistes dans leur domaine avec l'intention de renouveler cette expérience dans un contexte plus actuel.

Le concept

Mettre au point un procédé suffisamment portable ayant une bonne réactivité de mise en oeuvre, une précision capable de concurrencer les techniques terrestres avec un coût attractif, et y associer les nouveaux outils numériques de visualisation ; d'où l'idée de réaliser des orthophotographies et de restituer des zones d'études très petites à des échelles allant jusqu'à 1/200 et une précision moyenne de 10 cm en XYZ.

Prise de vue et chambre métrique

Pour rester dans l'esprit portabilité mon choix s'est naturellement orienté vers l'ULM et la chambre métrique 6X6.

■ L'ULM et la prise de vue

Souhaitant convaincre une large clientèle sur la faisabilité de prises de vues dans tous types de relief, notamment les zones escarpées comme certaines "ravines", quatre types





© Stéphane DUCANDAS

FK12 Comet biplan, Incursion dans le "Trou de fer"



© Stéphane DUCANDAS

Phase de synchronisation d'un GPS bi-fréquence embarqué

d'appareils sont actuellement utilisés par notre société :

- le Skyranger ou le FK9 Mark III, ailes hautes, 80 CV, vitesse de décrochage 65 km/h, utilisation fréquente.
- accessoirement, le FK12 Comet biplan est utilisé pour sa maniabilité sur des secteurs encaissés et difficiles d'accès, ou bien pour les altitudes élevées le FK14 Polaris pour sa rapidité (290 km/h en Vne).

Il a fallu adapter une ouverture (trappe) sur deux de ces appareils, les deux autres permettant la prise de vue latérale.

La technique en vol consiste à faire face à un courant laminaire stable et d'utiliser une vitesse lente, dans les limites de la sécurité, exemple :

- avec un vent de face de 30 km/h et une vitesse au "badin" de 80 km/h, la vitesse "sol" est de 50 km/h (80-50). Cette vitesse sol est celle observée dans la majeure partie des missions.

Le relief de l'Ile de la Réunion engendre une météo changeante ; les alizés quasi permanents, les thermiques aux abords des cirques, les courants ascendants ou descendants, rendent le pilotage très pointu.

Nous pouvons intervenir sur des chantiers nécessitant une PVA de 150 m à 3 500 m.

Le pilote est assisté d'un GPS de navigation de type GARMIN GPSMAP 182 C avec un écran couleur aux dimensions conséquentes, lui permettant d'apprécier, presque en temps réel, la dérive de l'ULM, et de conserver un cap précis. L'altimètre, recalé à chaque décollage, complète l'équipement indispensable.

La principale difficulté pour le pilote réside à conserver le cap et l'altitude du plan de vol projeté, sachant qu'il s'aligne 300 à 400 mètres avant la prise du cliché.

Des essais ont été réalisés avec un GPS bi-fréquence TRIMBLE (cadence 5 hertz) embarqué dans l'ULM et synchronisé avec la chambre métrique (chronomètre). Avec une vitesse moyenne "au sol" de 50 km/h (14 m/seconde) la position de la chambre est connue à environ 1,50 m en planimétrie et, compte tenue des turbulences en vol, estimée à 0,50 m en Z.

■ La chambre métrique

J'ai opté pour une chambre de type "ROLLEI 6 008 METRIC" avec deux objectifs "métric" PQS et calibrés : un Schneider 2.8-50 mm et un Planar 2.8- 80 mm calibrés.

En exemple le certificat de calibration du 80 mm nous donnent les valeurs de déformation suivantes :

Orientation interne :

CK = -80,12 mm

Xh = 0,12 mm

Yh = 0,36 mm

A1 = -8,5250E-006

A2 = -9,4780E-010

$CK\ DR = A1 * R * (R^2 - R0^2) + A2 * R * (R^4 - R0^4)$

R0 = 20,00 mm

La grille réseau de la chambre est gravée de 9 croix (9/25) dont l'écart moyen est de 0,0005 mm.

La faible vitesse en vol permet l'usage de nivelle sphérique pour la verticalité de l'axe optique.

La stabilisation gyroscopique n'est pas envisageable !

La vitesse de la chambre, associée à un dispositif de suspension en mousse, limite les vibrations et l'effet "vibré" du cliché :

- à 50 km/h le cliché au 1/1 000/seconde donne une traînée théorique de $50\,000/3\,600/1\,000 = 0,014\text{ m}$

Différentes émulsions couleurs, négatif ou diapo, ont été testées en fonction de leur comportement au scannage. La 100 iso Superia de FUJI résout beaucoup de problèmes !

A court terme le "passage" au dos numérique est à envisager ; pour le moment ceux-ci ne sont pas encore vraiment adaptés à la photo aérienne moyen format (définition insuffisante ou images bruitées, temps d'enregistrement des fichiers volumineux). IMACON propose un dos numérique intéressant, mais le capteur limite la surface utile de l'image à 50 mm x 50 mm, ce qui, pour nous, élimine les fiduciaires périmétriques de la grille réseau.

Choix du logiciel et traitement des données

■ Le choix du logiciel

Plusieurs logiciels ont été testés en fonction de l'objectif de précision à atteindre 10 cm en XYZ.

Le choix s'est porté sur le logiciel GEOimage développé et commercialisé par la société SPACEYES.

Ce logiciel, véritable atelier cartographique, regroupe les fonctionnalités essentielles d'un bon outil de production. Son architecture modulaire permet entre autre :

- de calculer différents modèles de déformation adaptés à la nature des données à traiter, orbitographique Spot, aérien.
- de réaliser des MNT à partir d'images stéréoscopiques satellites ou aériennes, par corrélation avec un éditeur de disparités permettant de contrôler les phases automatiques et d'intervenir le cas échéant.
- la rectification ou l'orthorectification des images avec acquisition de points d'appui de sources différentes.
- de réaliser des mosaïques d'images, avec un outil puissant de correction radiométrique.
- la représentation 3D des données géographiques.
- l'utilisation d'outils de traitement thématique et de photo-interprétation.
- l'utilisation d'un module d'aérotriangulation

■ Adaptation du logiciel à notre objectif

Sans être un restituteur analytique GEOimage permet le traitement de nos données. Sa conception au départ ne le destine pas à une précision de 10 cm mais plutôt de l'ordre de 1 m ; il a donc fallu l'adapter (Exemple, modifier le MNT en flottant pour obtenir des décimales, etc.)

Avec l'aide des Ingénieurs de SPACEYES, nous sommes arrivés à des valeurs avoisinant les 30 cm, avec des contraintes de stéréopréparation.

La réalisation d'un modèle homogène nécessite un minimum de points de calage, de 9 à 20 selon la précision souhaitée. L'objectif n'est pas encore atteint, mais le département développement de SPACEYES travaille sur un module permettant de prendre en compte les données de calibration et toutes les fiduciaires.

Après avoir réalisé une ortho sur GEOimage, et pour en améliorer sa précision planimétrique, nous utilisons un autre logi-



Préparation du plan de vol ; introduction des way-points dans le GPS

ciel "Photoplan" qui permet un réajustement par triangles de tous les points de calage. L'image résultat est donc parfaite aux abords des points de calage, et les écarts constatés sur les nombreux points de contrôle relevés lors de la stéréo préparation n'excèdent jamais 15 à 20 cm, suivant le relief.

Nous effectuons ensuite une restitution planimétrique à partir des orthophotos. Le gros désavantage est la difficulté à reconnaître les détails en sursol (poteaux, murs etc.).

Le scanner

Avant traitement des données sur GEOimage, nous scannons nos négatifs avec le scanner NIKON COOLPIX 8000, à 4 000 dpi. (6 microns) soit un fichier de 230 Mo ! La visualisation de détails de quelques centimètres est alors possible, mais les problèmes d'artefacts rendent les phases de corrélation délicates. Il est alors nécessaire de rééchantillonner le fichier à 12 microns pour l'élaboration du MNT. Par contre nous utilisons la meilleure définition de scan pour la phase d'orthorectification. A court terme, nous envisageons l'acquisition d'un scanner matriciel pour minimiser les déformations.

Des tests de rectification d'image en sortie de scanner sont en cours ; ces tests sont réalisés avec "Lens Rectifier Pro" qui transforme un cliché brut en cliché orthonormé. Le principe est de photographier une grille de 80 cm x 80 cm avec des lignes et colonnes espacées de 2 cm, et de calculer un modèle de déformation applicable systématiquement aux images issues de la même chambre et scannées. L'image ainsi rectifiée devrait permettre une meilleure précision ; ce qui reste à démontrer.

Validation de la méthode

Afin de connaître les limites de la méthode (avantages et désavantages) la société LEICA a effectué un test sur trois couples d'image avec leur restituteur analytique LPS :

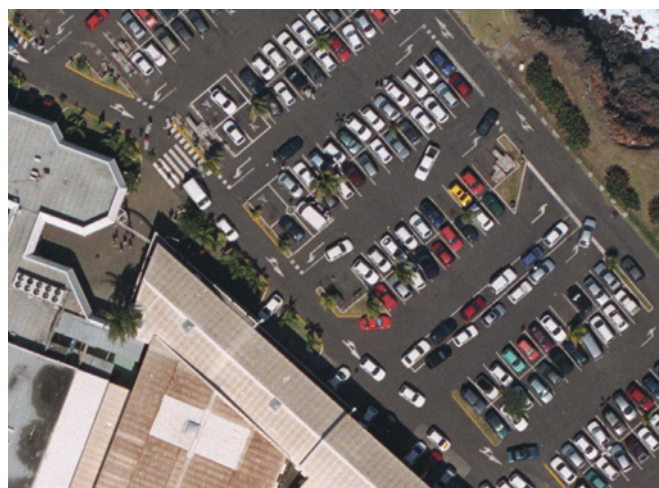
- Altitude de PVA 400 m
- Focale 80.12
- Scan à 4 000 dpi
- Echelle 5000

Les données ci avant ont été introduites dans les calculs et complétées par la prise en compte de toutes les fiduciales et des déformations de la chambre. Les résultats obtenus sont de l'ordre de 10 cm avec des pointés inférieurs à 5 cm. Par ailleurs, ces tests ont mis en évidence la nécessité d'utiliser un scanner matriciel, plus précis. La vision stéréo s'est avérée plus confortable à 3 000 dpi.

Conclusion

Ce système permet donc la restitution jusqu'au 1/200 en densifiant légèrement la stéréopréparation, surtout en périphérie des images à cause du vignetage, et en utilisant un restituteur analytique type LPS pour avoir une précision optimale et la possibilité d'effectuer une restitution vectorielle. GEOimage est un très bon outil de production jusqu'à 50 cm dans des conditions d'utilisation normales ; la précision, dans sa version actuelle, peut atteindre 30 cm à la condition de densifier les points de calage lors de la stéréopréparation ; son coût attractif peut séduire certains cabinets de Géomètres Experts. GEOimage est par contre un véritable outil de production dans son domaine "métrique".

A tester les logiciels de rectification comme LENS RECTIFIER PRO, voire PHOTODELER qui permet de calibrer soit même une chambre et son objectif. ●



Exemple de définition

Contact

Gabriel DUCANDAS

Géomètre Expert, SARL GUID-OI, Ile de La Réunion
gd.guidoi@wanadoo.fr

Remerciement

Remerciements à Didier BOMBAMIR pilote hors pair pour la mise au point en vol, à Stéphane (mon fils) pour ses prises de vues acrobatiques et pour sa participation éclairée dans la mise au point de toute la chaîne infographique, à mes deux associés pour leurs conseils avisés et à quelques ingénieurs de l'IGN (années 1970-1971) pour m'avoir mis le pied à l'étrier, aux Ingénieurs de la Société SPACEYES pour leur patience et la poursuite des développements, à Sylvain GEVREY et Patrice LEMIRE de chez LEICA.



FK9 Mark III en pleine action

Trajectoire d'avion par GPS pour la gravimétrie aéroportée

■ F. DUQUENNE, A.V.OLESEN, J. CALI

Pour améliorer le géoïde français sur la Corse un levé de gravimétrie aéroportée a été réalisé par une collaboration entre KMS, l'Université de Bergen, l'ESGT, l'IGN et l'INSU. Les mesures gravimétriques ont été positionnées à l'aide de GPS. A bord de l'avion, deux récepteurs étaient connectés à une seule antenne. Au sol quatre récepteurs étaient installés sur la côte d'Azur française ainsi que deux en Corse. Les trajectoires ont été calculées plusieurs fois, avec chaque station de référence, dans le sens direct et dans le sens inverse au moyen du logiciel GRAFNAV. La longueur des lignes de base atteint plusieurs centaines de kilomètres. Les différentes solutions sont comparées et combinées, ce qui donne une bonne estimation de la précision en position, vitesse et accélération. La précision en position absolue horizontale est meilleure que 10 cm, et 20 cm en vertical. En positionnement relatif sur la trajectoire la précision est bien meilleure, de l'ordre du centimètre. Les calculs GPS sont expliqués ci-dessous ainsi que les résultats des comparaisons en position, vitesse et accélération par trajectoire.

Le calcul du quasi-géoïde Français (QGF98) a mis en évidence des erreurs dans la gravimétrie marine entre la Côte d'Azur et la Corse (Duquenne H, 1998). Profitant de la mission de gravimétrie aéroportée en Méditerranée (CAATER), un levé gravimétrique aéroporté a été réalisé en collaboration entre le service du cadastre danois KMS, l'université de Bergen (Norvège), l'ESGT, l'IGN et l'INSU du 20 au 22 février 2001.

L'avion ARAT (Fokker 27) de l'IGN, affrété par l'INSU, piloté par un équipage de l'IGN, a volé à une altitude d'environ 300 m et une vitesse d'environ 300 km/h. L'avion a utilisé trois aéroports pour décoller et atterrir : Toulon, Bastia et Ajaccio. Dans la suite nous présentons la détermination des trajectoires par GPS, en essayant d'en déduire des précisions sur la position, la vitesse et l'accélération de l'avion.

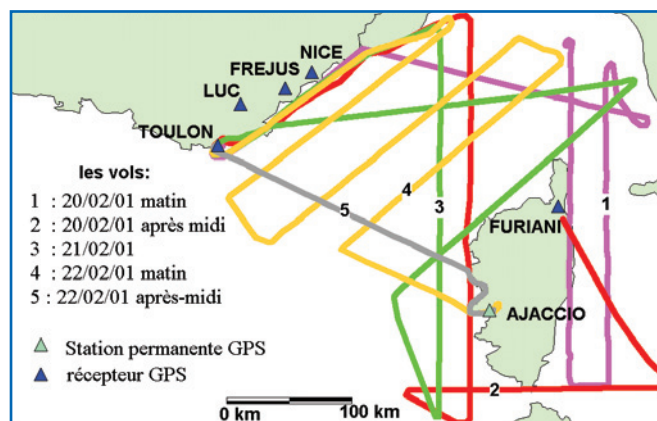


Figure 1 : trajectoires de l'avion et stations GPS de référence.

Les observations GPS

A bord de l'avion, deux récepteurs bifrèquence sont connectés à la même antenne. La cadence d'enregistrement des observations est une seconde. Les récepteurs sont mis en route au moins un quart d'heure avant le décollage, et restent quelque fois allumés quelques dizaines de minutes à l'atterrissage. Ceci permettra d'initialiser le calcul en mode cinématique par un positionnement statique.

Au sol six stations GPS sont installées pour servir de référence : quatre sur la Côte d'Azur et deux en Corse (fig. 1). La station de TOULON est sur l'aéroport et les stations de FURIANI et AJACCIO à quelques kilomètres des aéroports de Bastia et Ajaccio.

L'ensemble des stations enregistre les observations toutes les secondes. Les stations AJACCIO, FURIANI et FREJUS sont des points du nouveau réseau géodésique français, le RGF.

Les calculs GPS

Dans un premier temps les coordonnées de toutes les stations au sol sont calculées dans le système géodésique Français RGF93 qui est similaire au système européen ETRS89.

Le calcul est réalisé avec le logiciel SKI version 2.3, en mode statique "ionosphere free" (L3), avec toutes les observations enregistrées sur ces stations pendant les vols de l'avion. Les coordonnées obtenues sont centimétriques.

Pour les calculs de trajectoire le logiciel utilisé est GRAFNAV version 6.0. Il s'agit d'un calcul de positionnement relatif,

entre un point de référence au sol et le récepteur de l'avion, toutes les secondes.

Les mesures de phase sont traitées sur les deux fréquences L_1 , L_2 , en formant les équations d'observation en double différence :

$$\nabla\Delta\Phi = \nabla\Delta\rho + \lambda\nabla\Delta N + \nabla\Delta\delta\rho_{iono} + \nabla\Delta\delta\rho_{tropo} + \nabla\Delta m + \nabla\Delta e + \nabla\Delta\varepsilon_\phi \quad (1)$$

ϕ : mesure de phase [m]

ρ : distance géométrique entre satellite et récepteur :

$$\rho = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad [\text{m}]$$

N : ambiguïté entière [cycles]

$\delta\rho_{iono}$: correction ionosphérique [m]

$\delta\rho_{tropo}$: correction troposphérique [m]

m : erreur due aux multi trajets [m]

e : erreur due aux éphémérides [m]

ε_ϕ : bruit de la mesure de phase [m]

Les inconnues sont les coordonnées (X,Y,Z) du récepteur de l'avion et N , les ambiguïtés entières.

Les options du calcul présenté ici sont les suivantes :

- éphémérides précises de l'IGS,
- combinaison L_3 (ionosphere free) qui permet d'éliminer le premier ordre de l'effet ionosphérique. Ceci est indispensable ici puisque les longueurs des lignes de base sont de plusieurs centaines de kilomètres.
- utilisation du modèle troposphérique SASTAMOINEN : la correction troposphérique reste le problème majeur de la précision sur la hauteur. Il n'y a pas de mesure de météorologie, ni au sol, ni dans l'avion.

Cependant ici le problème est minimisé par le fait que l'avion vole bas (300 m d'altitude), et donc il y a peu de variation entre les stations au sol et le récepteur embarqué.

- Résolution des ambiguïtés sans fixation (solution flottante) : la résolution des ambiguïtés se fait différemment au début de la trajectoire (initialisation) et en cours de vol :
 - Au début (ou à la fin de la trajectoire pour les calculs inverses) on calcule la position du récepteur avant décollage, en statique, à partir de la station la plus proche. Puis dans le calcul cinématique on fixe la première position, ce qui permet de résoudre facilement les ambiguïtés, même si on détermine la trajectoire à partir d'une station très éloignée (plusieurs centaines de kilomètres)
 - En vol, un algorithme de résolution des ambiguïtés en vol est utilisé.
- Il n'y a pas de traitement particulier des multi trajets, ce qui peut provoquer des problèmes de résolution d'ambiguïtés. Des multi trajets à la station de référence peuvent durer quelques minutes, tandis que les multi trajets au niveau de l'avion sont en général furtifs, à cause du mouvement de l'avion qui provoque des changements rapides de la position relative des satellites. En calculant la trajectoire à partir de plu-

sieurs stations, et en les comparant on peut mettre en évidence les multi trajets sur les stations au sol. Ceux de l'avion influent sur la résolution des ambiguïtés, mais cet effet diffère selon la distance entre l'avion et la station de référence.

Résultats des comparaisons de trajectoires

Les trajectoires ont été calculées avec toutes les stations quand cela était possible, c'est à dire lorsque le récepteur de la station était allumé avant le décollage de l'avion. On a aussi procédé au calcul de la trajectoire inverse, lorsque le récepteur est resté allumé suffisamment longtemps après l'atterrissage pour pouvoir calculer sa position en statique.

On peut remarquer ici que pour les aéroports de Bastia et Ajaccio la station la plus proche est à 10 km pour l'un et 3 km pour l'autre ce qui nécessite un temps d'observation d'au moins une demi-heure. Dans la suite on détaillera par des graphiques la comparaison de la trajectoire du 20/02/01 après-midi (n°2) calculée à partir de Toulon d'une part et d'Ajaccio d'autre part. Ces deux stations sont éloignées l'une de l'autre de 250 km.

■ Comparaison en position

Les figures 2, 3 et 4 montrent les différences en latitude, longitude et hauteur de la trajectoire 2 entre le calcul avec la référence à Toulon et celui avec la référence à Ajaccio.

On peut remarquer que la variation de coordonnées est inférieure à 8 centimètres en horizontal et 14 cm en hauteur. Un "décrochement" intervient entre les époques 230110 et 230284 soit pendant 174 s. L'amplitude atteint 4 cm en horizontal et 12 cm en vertical. On voit par ailleurs qu'entre ces deux époques le décrochement est à peu près constant. On peut identifier la cause de cet écart. Il pourrait être provoqué par un changement de constellation des satellites reçus par l'avion (Bruton A.M., 2000). Ce n'est pas le cas ici, les satellites observés sont les mêmes avant et après l'incident et sont au nombre de huit. On peut suspecter des multitrajets soit à l'une des stations, soit sur l'avion. Pour cela le calcul avec plusieurs stations peut nous aider : ici on fait trois comparaisons de trajectoires :

- Toulon-Ajaccio
- Toulon-Nice
- Nice-Ajaccio

Les deux premiers calculs mettent en évidence le décrochement, tandis que le dernier n'en présente pas. On peut en déduire que probablement il y a un multi trajet à la station de

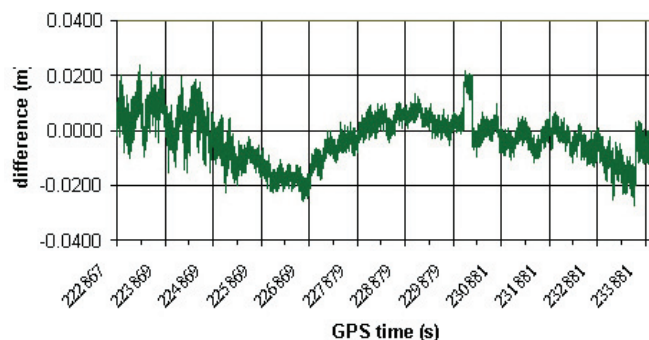


Figure 2 : différence de coordonnées composante Nord.

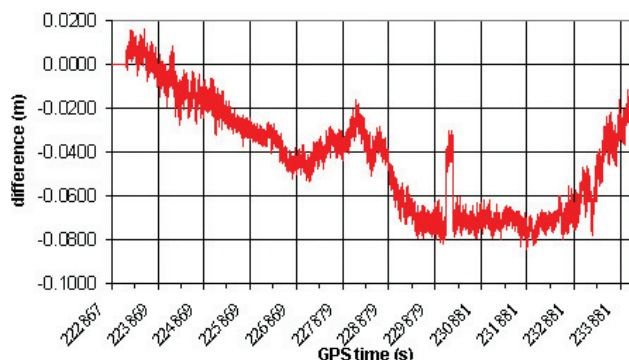


Figure 3 : différence de coordonnées Est.

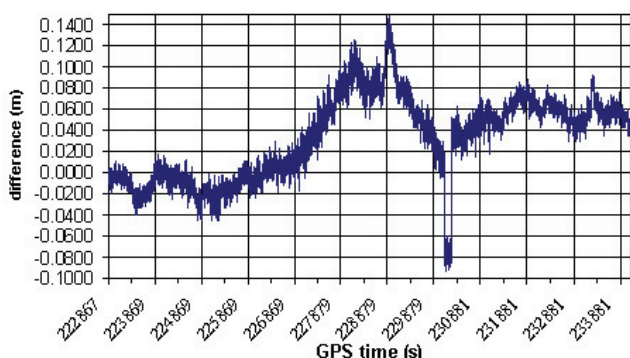


Figure 4 : différence en hauteur.

Toulon. Pour en être sûr, on a procédé à un calcul des trois lignes de bases en statique. L'examen des résidus montre des résidus forts (3-4 cm) sur un même satellite pour les lignes de base Toulon-Ajaccio, et Toulon Nice, tandis que la ligne de base Nice-Ajaccio a des résidus faibles (1-2 mm) sur ce satellite. Le multi trajet à la station Toulon semble confirmé, et on peut retirer quelques observations sur le satellite 17 puis refaire le calcul de la trajectoire.

Pour chaque trajectoire on présente ci-dessous une comparaison avec deux stations de référence.

Tableau 1 : trajectoires comparées (tableaux 2 à 4).

| N° | REFÉRENCE 1 | REFÉRENCE 2 | LONGUEUR |
|----|-------------|-------------|----------|
| 1 | Toulon | Ajaccio | 980 km |
| 2 | Toulon | Ajaccio | 970 km |
| 3 | Toulon | Ajaccio | 1200 km |
| 4 | Toulon | Furiani | 1150 km |
| 5 | Toulon | Ajaccio | 270 km |

Le résumé des comparaisons en coordonnées pour chaque trajectoire est donné dans les tableaux 2, 3 et 4. En moyenne la précision en position horizontale est meilleure que 10 cm, et 20 cm en vertical. On voit ici l'influence de la troposphère sur la composante verticale.

Tableau 2 : différences des composantes nord (m).

| N° | MOYENNE | RMS | MIN | MAX |
|----|---------|-------|--------|---------|
| 1 | -0.059 | 0.072 | -0.118 | 0.053 |
| 2 | -0.003 | 0.009 | -0.024 | -0.0273 |
| 3 | -0.019 | 0.049 | -0.066 | 0.064 |
| 4 | -0.027 | 0.110 | -0.126 | -0.136 |
| 5 | -0.011 | 0.055 | -0.160 | -0.039 |

Tableau 3 : différences des composantes est (m).

| N° | MOYENNE | RMS | MIN | MAX |
|----|---------|-------|--------|--------|
| 1 | -0.088 | 0.091 | -0.126 | -0.012 |
| 2 | -0.042 | 0.049 | -0.085 | 0.015 |
| 3 | -0.011 | 0.031 | -0.079 | 0.098 |
| 4 | 0.003 | 0.039 | -0.096 | 0.108 |
| 5 | -0.099 | 0.102 | -0.170 | 0.033 |

Tableau 4 : différences en hauteur (m).

| N° | MOYENNE | RMS | MIN | MAX |
|----|---------|-------|--------|-------|
| 1 | 0.081 | 0.112 | -0.043 | 0.191 |
| 2 | 0.033 | 0.051 | -0.094 | 0.148 |
| 3 | 0.025 | 0.046 | -0.137 | 0.151 |
| 4 | 0.026 | 0.083 | -0.164 | 0.183 |
| 5 | 0.129 | 0.179 | -0.220 | 0.264 |

■ Comparaison en vitesse

La vitesse est calculée à partir des positions :

$$x'(t) = \frac{x(t+1) - x(t-1)}{2} \quad (2)$$

On a déjà remarqué que la précision relative sur la trajectoire était nettement meilleure qu'en absolu, et bien sûr on retrouve cela sur la vitesse qui est meilleure que 0.005 m/s en horizontal, et 0.010 m/s en vertical. La vitesse verticale est moins bonne, et plus perturbée qu'en horizontal. On remarque que le décrochement en position a très peu d'influence en vitesse, quelques cm/s, quelques secondes au début et à la fin de l'incident.

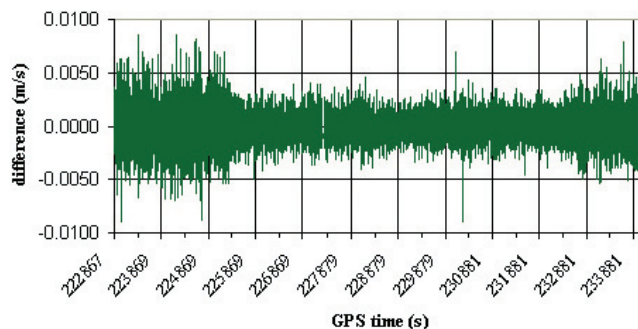


Figure 5 : différence de la composante nord de la vitesse.

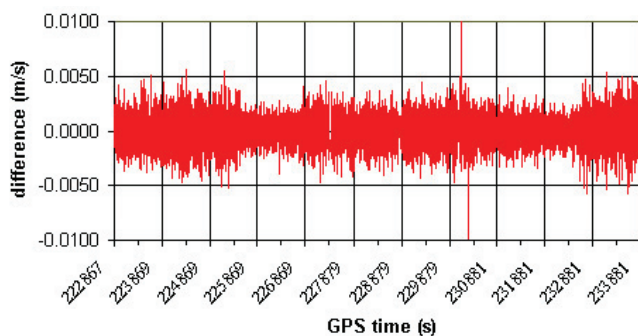


Figure 6 : différence de la composante est de la vitesse.

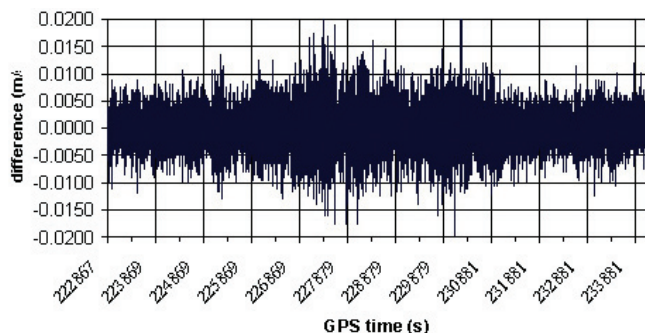


Figure 7 : différence de la composante verticale de la vitesse.

- Les tableaux de 5 à 7 donnent les statistiques sur les différences en vitesse pour toutes les trajectoires, en m/s. En moyenne on constate des écarts de 2-3 mm/s en vitesse horizontale et 4-5 mm/s en vitesse verticale.

Tableau 5 : différences en vitesse (composante nord, m/s).

| N° | MOYENNE | RMS | MIN | MAX |
|----|--------------|-------|--------|-------|
| 1 | -2.10^{-5} | 0.002 | -0.005 | 0.005 |
| 2 | -3.10^{-6} | 0.001 | -0.005 | 0.005 |
| 3 | 2.10^{-8} | 0.001 | -0.006 | 0.005 |
| 4 | 2.10^{-6} | 0.003 | -0.011 | 0.011 |
| 5 | 2.10^{-7} | 0.002 | -0.005 | 0.006 |

Tableau 6 : différence en vitesse (composante est, m/s).

| N° | MEAN | RMS | MIN | MAX |
|----|--------------|-------|--------|-------|
| 1 | 4.10^{-6} | 0.001 | -0.003 | 0.003 |
| 2 | 1.10^{-6} | 0.001 | -0.004 | 0.004 |
| 3 | 6.10^{-6} | 0.001 | -0.005 | 0.005 |
| 4 | -5.10^{-6} | 0.002 | -0.007 | 0.007 |
| 5 | 2.10^{-6} | 0.002 | -0.016 | 0.016 |

Tableau 7 : différence en vitesse verticale (m/s).

| N° | MEAN | RMS | MIN | MAX |
|----|--------------|-------|--------|-------|
| 1 | 2.10^{-5} | 0.004 | -0.010 | 0.010 |
| 2 | 6.10^{-6} | 0.004 | -0.013 | 0.012 |
| 3 | -3.10^{-5} | 0.005 | -0.016 | 0.015 |
| 4 | -7.10^{-6} | 0.007 | -0.021 | 0.022 |
| 5 | -9.10^{-5} | 0.006 | -0.026 | 0.029 |

■ Comparaison en accélération

L'accélération est calculée à partir de la vitesse :

$$x''(t) = \frac{x'(t+1) - x'(t-1)}{2} \quad (3)$$

Les écarts en accélération sont très faibles, en moyenne moins de 2 mm/s² en horizontal et un peu plus de 3 mm/s² en vertical. L'effet du décrochement devient très petit.

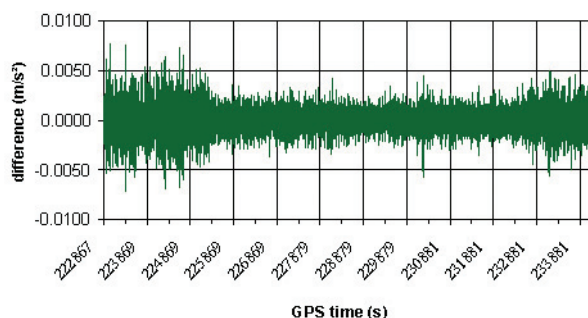


Figure 8 : différence en accélération (composante nord).

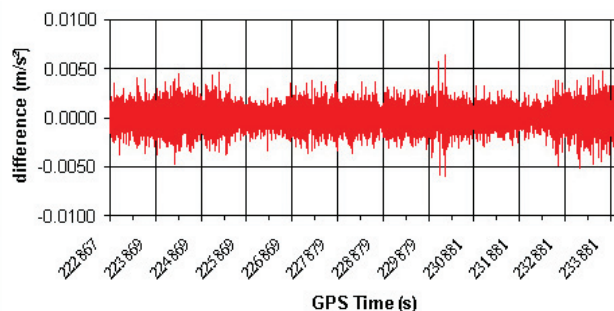


Figure 9 : différence en accélération (composante est).

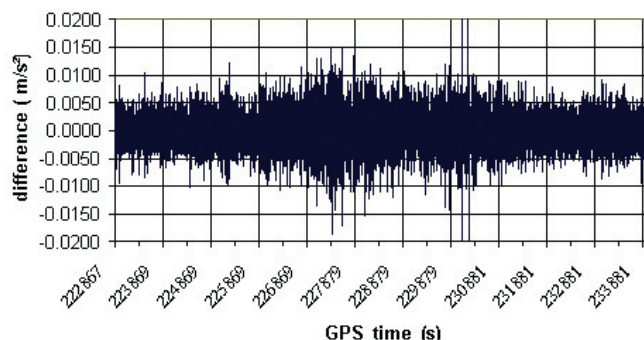


Figure 10 : différence en accélération (composante verticale).

Les tableaux 8 à 10 donnent les statistiques sur les différences d'accélération pour toutes les trajectoires en m/s².

Tableau 8 : différence en accélération (composante nord, m/s²).

| N° | MOYENNE | RMS | MIN | MAX |
|----|--------------|-------|--------|-------|
| 1 | -2.10^{-5} | 0.002 | -0.005 | 0.005 |
| 2 | -3.10^{-6} | 0.001 | -0.005 | 0.005 |
| 3 | 2.10^{-8} | 0.001 | -0.006 | 0.005 |
| 4 | 2.10^{-6} | 0.003 | -0.011 | 0.011 |
| 5 | 2.10^{-7} | 0.002 | -0.005 | 0.006 |

Tableau 9 : différence en accélération (composante est, m/s²).

| N° | MEAN | RMS | MIN | MAX |
|----|--------------|-------|--------|-------|
| 1 | 4.10^{-7} | 0.001 | -0.003 | 0.003 |
| 2 | 2.10^{-7} | 0.001 | -0.003 | 0.003 |
| 3 | -1.10^{-7} | 0.001 | -0.004 | 0.004 |
| 4 | 2.10^{-6} | 0.001 | -0.005 | 0.005 |
| 5 | 3.10^{-6} | 0.001 | -0.004 | 0.004 |

Tableau 10 : différence en accélération verticale (m/s²).

| N° | MEAN | RMS | MIN | MAX |
|----|--------------|-------|--------|-------|
| 1 | 2.10^{-5} | 0.003 | -0.007 | 0.007 |
| 2 | 4.10^{-7} | 0.003 | -0.011 | 0.011 |
| 3 | 1.10^{-5} | 0.003 | -0.013 | 0.013 |
| 4 | -4.10^{-7} | 0.006 | -0.018 | 0.018 |
| 5 | 2.10^{-5} | 0.004 | -0.013 | 0.011 |

Les comparaisons montrent que l'on obtient l'accélération avec une bonne précision de l'ordre de quelques mm/s² quelles que soient les longueurs des lignes de bases. Ces résultats semblent significatifs car le bruit est en moyenne 0 à tout instant et la corrélation dans le temps est de quelques secondes.

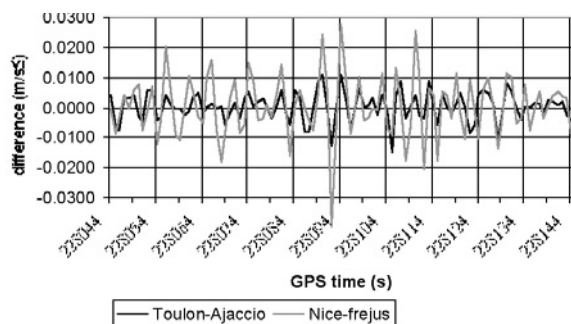


Figure 11 : Différences en accélération verticale : zoom sur 100 s.

La figure 11 montre un zoom sur 100 s de la comparaison des accélérations verticales de la trajectoire 2, d'une part avec les références Toulon-Ajaccio, d'autre part Nice-Fréjus. On peut constater clairement une corrélation entre les bruits des deux comparaisons, ce qui montre que la combinaison de plusieurs trajectoires ne pourra pas éliminer tous les bruits.

Utilisation pour la gravimétrie aéroportée

Le GPS permet d'une part de positionner les mesures gravimétriques et d'autre part contribue à leur réductions. En ce qui concerne le positionnement la précision obtenue est largement suffisante, pour la réduction des observations il faut discuter selon la correction.

Le calcul des anomalies gravimétriques au niveau de l'avion est obtenu par : (Olesen A.V., 2002).

$$\Delta g = A_z - A_{z0} - h'' + \delta g_{\text{Eötvös}} + \delta g_{\text{tilt}} + g_0 - \gamma_0 - (h - N) \partial \gamma / \partial h \quad (4)$$

où A_z est la lecture au gravimètre, A_{z0} la lecture à la référence, h'' l'accélération verticale de l'avion donnée par GPS ramenée au point de mesure, $\delta g_{\text{Eötvös}}$ la correction d'Eötvös (formule de Harlan, 1968), g_0 la valeur de la pesanteur à la référence, γ_0 la valeur de l'accélération normale, h la hauteur ellipsoïdale donnée par GPS, N la hauteur du géoïde (modèle EGM96) et δg_{tilt} la correction d'horizontalité du bras du gravimètre. Les déterminations GPS interviennent dans trois termes :

- La correction $-(h-N) \partial \gamma / \partial h$ qui corrige la mesure pour la ramener au niveau 0 : la variation de γ par rapport à la hauteur est de $-3.086 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$ donc une erreur de 1 mètres sur h donne une erreur de $1 \mu\text{m/s}^2$ (0.1 milligal). La précision de h par GPS est largement suffisante.
- La correction d'Eötvös est due à la vitesse de l'avion (composante verticale de l'accélération de Coriolis) : d'après (Torge W., 1989), à la vitesse 300 km/h, pour une précision de la correction de $5 \mu\text{m/s}^2$ (0,5 milligals), il faut une précision sur la vitesse d'au moins 0.03 m/s. Donc le GPS répond à cette précision sans traitement particulier.
- la correction de l'accélération verticale de l'avion est la plus délicate, car pour avoir une précision de 1 milligal il faudrait une précision sur l'accélération verticale GPS de 10^{-6} m/s^2 . Comme le montre le tableau 10 la précision est de l'ordre de quelques mm/s^2 . Cependant, on peut voir dans la figure 11, qui est un zoom sur 100 s que la corrélation en temps est de quelques secondes et la moyenne nulle à tout moment. Il apparaît qu'il est facile de filtrer.

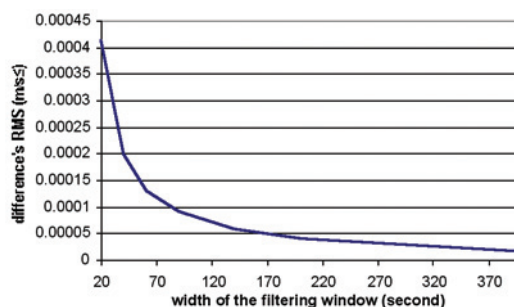


Figure 12 : RMS des différences d'accélération en fonction de l'ordre du filtre de Savitzky Golay.

Dans la figure 12 on voit le RMS des différences en accélération verticale pour deux calculs d'une même trajectoire après filtrage de chaque accélération sur toute la trajectoire par un filtre de Savitzky Golay de différents ordres (Press W.H. et al., 1992) : l'ordre 20 correspond à un filtrage sur 40 s. A l'ordre 80, le RMS est environ 5.10^{-6} m/s^2 (5 milligals) Pour le calcul des anomalies donné par l'équation (4), un filtre sur 200 s est appliqué sur Δg . Les mesures de gravimétrie et l'accélération verticale par GPS sont donc filtrées simultanément.

Une série de six filtres de Butterworth sont appliqués. Les figures 13 à 15 montrent les anomalies de gravité non filtrées, puis filtrées par des filtres de demi-amplitude en temps de 20 s et 200 s. L'application du filtre de 200 s donne un RMS sur l'accélération par GPS de 10^{-6} m/s^2 , la moyenne étant 0. On peut ainsi dire que la gravimétrie aéroportée n'est pas limitée en précision par GPS en considérant un filtrage à 200 s.

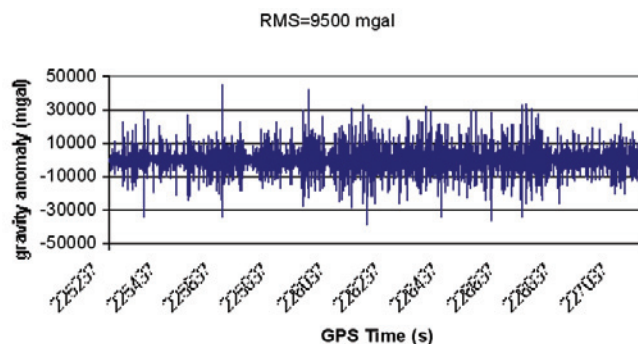


Figure 13 : anomalies de gravité brutes, non filtrées.

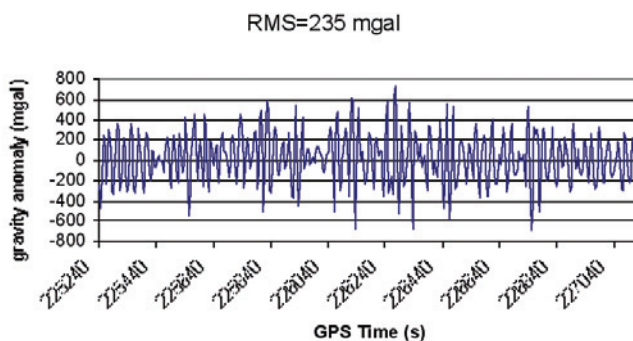


Figure 14 : Anomalies de gravimétrie filtre de 20 s.

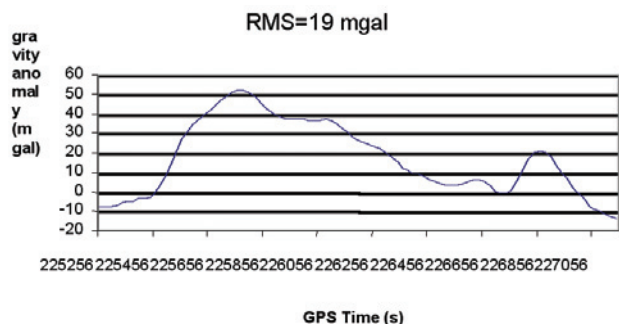


Figure 15 : Anomalies de gravimétrie filtre de 200 s.

Conclusions et perspectives

La détermination des trajectoires d'avion par GPS répond bien aux besoins de la gravimétrie aéroportée. Les précisions sans filtrage sont de l'ordre de 10 cm en position horizontale, de 20 cm en hauteur. La vitesse est obtenue à mieux que le centimètre par seconde et l'accélération à quelques mm/s^2 . Après filtrage sur 200 s en accélération verticale on obtient quelques mm/s^2 . On peut aussi constater que la méthode convient aussi à la photogrammétrie aérienne pour des échelles de cartographie jusqu'à 1 : 2000 ainsi que pour des levés lasers aéroportés.

L'observation, puis le calcul avec plusieurs stations au sol permet un contrôle et une estimation de précision de la trajectoire, mais aussi d'identifier, voire de corriger les effets des multi-trajets. Les perspectives concernant les calculs est d'avoir un calcul multi-référence, c'est à dire qu'à tout instant chaque position est déterminée par les différentes stations aux sols. Les observations et les calculs à partir de plusieurs stations au sol, même lointaines permettent de vérifier et d'estimer la précision de la trajectoire. Ceci permet aussi d'identifier et de corriger des multi trajets comme dans le cas de la trajectoire n°2. Pour cette mission une seule station du réseau GPS permanent français (RGP) a été utilisée car les stations les plus proches n'étaient pas cadencées à la seconde. Si ces stations étaient modifiées pour enregistrer à la seconde, cela éviterait d'installer au sol des récepteurs pour chaque vol. ●

F. DUQUENNE

Laboratoire de Géodésie et Géomatique, Ecole Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT) – chef du Service de la géodésie et du Nivellement, Institut Géographique National.
email : Francoise.Duquenne@ign.fr

A.V.OLESEN

Geodynamics Dept., National Survey and Cadastre (KMS)

J. CALI

Laboratoire de Géodésie et Géomatique, Ecole Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT)

Remerciements

Ce projet a été possible grâce aux interventions de : C. Allet (INSU), A. Balandier (ESGT), P. Courbon, H. Duquenne (ESGT), R. Forsberg (KMS), A. Gidskehaug (Bergen University), M. Kasser (IGN), G. Penazzi (INSU), M. Pilotto (IGN), R. Riou (ESGT).

ABSTRACT

Key words : GPS, airborne gravimetry, trajectory

In order to improve the French geoid in the Corsican area an airborne gravimetric survey was carried out in close co-operation between KMS, Bergen University, ESGT, IGN and INSU. Gravimetric data were positioned and corrected using GPS. Aboard the plane, two receivers were connected to a single antenna. On ground four receivers were set on the French Riviera coast and two in Corsica. Trajectories were computed several times, with each reference station used in the direct and reverse way with GRAFNAV software. The baselines length reached several hundred kilometres. The solutions are compared and combined, and give a good estimate of position, velocity and acceleration accuracy. The accuracy in position is better than 10 cm in horizontal absolute position and 20 cm in height. In relative positioning the accuracy is to cm-level. Therefore we get precise velocity and acceleration. In the paper, the GPS computations are explained, and the results of comparison between different computations of the same trajectory is summarised in position, velocity and acceleration for each trajectory.

Références

- Bruton M.A. (2000).** Improving the accuracy and Resolution of SINS/DGPS Airborne Gravimetry. UCGE reports Number 20145. University of Calgary.
- Duquenne F. (2001).** Gravimétrie Aéroportée Corse-Provence : rapport du calcul des trajectoires GPS. Report. Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (France).
- Duquenne H. (1998).** QGF98, a new solution for the quasigeoid in France. Proceedings of the second continental workshop on the geoid in Europe. Reports of the Finnish Geodetic Institute, 98 : 4, pp251-255, M. Vermeer and J. Adam, editors.
- Duquenne H. (1999).** Comparison and combination of a gravimetric quasigeoid with a levelled GPS data set by statistical analysis. Physics and Chemistry of the Earth, vol.24 A, n°1, pp79-83.
- Forsberg R., Olesen A.V. and Keller K. (1999).** Airborne Gravity Survey of the North Greenland Shelf 1998. Kort. og Matrikelstyrelsen Technical Report n° 10.
- Olesen, A. V., R. Forsberg, K. Keller, A. Gidskehaug (2000 a).** Airborne Gravity Survey of Lincoln Sea and Wandel Sea, North Greenland. Chemistry and Physics of the Earth, Vol 25 A, pp 25-29.
- Olesen, A. V., A. H. Kearsley, R. Forsberg (2000b).** Great Barrier Reef Airborne Gravity Survey (Braggs'99). A Gravity Survey Piggy backed on an Airborne Bathymetry Mission. In : M. G. Siderius (ed.) : Gravity, Geoid and Geodynamics 2000, IAG symposium Vol. 123, pp. 247-251, Springer Verlag.
- Olesen A.V., Forsberg R., Keller K., Kearsley (2002)** A.H.W. : error sources airborne gravimetry employing spring-type gravimeter - In J. Adam and K.P. Schwarz (eds) : vistas for Geodesy in the new Millenium, IAG symposium vol.125, 205-210, Springer Verlag.
- Olesen A.V. (2002).** Airborne Gravity Project Povenice-Corsica February 20-22, 2001 - unpublished Report, National Survey and Cadastre, Denmark
- Press W.H., Tenkolsky A.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. (1992).** Numerical recipes in Fortran. 2nd edition. Cambridge University Press.
- Torge W. (1989).** Gravimetry. De Gruyter Verlag.

Projet de développement du SIG du CERN.

Application à la gestion du réseau de fibres optiques

■ Cláudio CARNEIRO - Leonel GONÇALVES - Bernard GUYOT - Michel MAYOUD

Le CERN est le plus grand laboratoire mondial de physique des particules, dont l'activité est assurée par plus de 8 000 personnes. Le SIG du CERN couvre environ 1 400 ha, avec 1 300 constructions, 70 km de tunnels et galeries pour les accélérateurs et leurs expériences, 1 000 km de services enterrés, 500 000 m² de surface bâtie, etc.

Dans un contexte tenant à la fois de la petite ville et d'un grand complexe industriel, la gestion et la consultation des données localisées et des multiples informations corrélées se doivent d'être toujours adaptées à l'évolution rapide des moyens informatiques du CERN (là où le Web est né) et de répondre aux attentes de productivité et d'efficacité des divers co-producteurs ou simples utilisateurs de ce système.

Cet article présente une méthodologie de développement d'applications SIG spécifiques à chaque groupe d'utilisateurs. Pour atteindre les objectifs stipulés, l'adoption de la Norme ISO/19131 et d'une approche Orientée Objet (OO) permettent une meilleure compréhension de l'information géographique, ainsi que l'harmonisation des concepts relatifs à son utilisation. L'exemple d'application exposé, relatif à la gestion du réseau de fibres optiques, répond aux objectifs du projet et aux besoins formulés par les utilisateurs.

La démarche analytique globale et les procédures mises en œuvre visent à ce que les Systèmes d'Information Géographique puissent être développés de manière structurée, cohérente et réutilisable pour l'intégration de diverses applications internes, dans un concept le plus universel possible.

■ mots clés

Systèmes d'Information
Géographique, Spécification
de Données Géographiques,
Orientation Objet, Évaluation de
Procédés, Production de Données
Géographiques, Fibres Optiques

Une gestion performante des données localisées de toutes sortes et la production immédiate d'informations associées sont une nécessité impérieuse des grandes organisations possédant un important patrimoine technique et immobilier.

Dans un contexte industriel (ou similaire), la mise en œuvre d'un système d'information géographique (SIG) sur un grand site d'activité conduit cependant très vite à interférer avec les bases de données et les systèmes professionnels des services techniques responsables des divers équipements. Le CERN, à cet

égard, est rendu complexe par l'importance et la technicité très poussée des moyens développés pour la recherche et pour les accélérateurs de particules - le tout dans un environnement informatique exceptionnel, très évolutif.

La mise en œuvre d'un SIG au CERN a été un peu tardive (1984), sous la poussée des besoins du grand projet LEP (accélérateur de 27 km de circonférence), parce que les priorités portent évidemment plus sur la recherche que sur les moyens de la gestion du site - mais aussi parce que le Groupe "Métrologie de Positionnement et

Topométrie" a préféré attendre un système permettant de traiter toute la chaîne numérique, levé topographique inclus. Le choix s'était initialement porté sur les logiciels LILIAN et ESPACE, de la société INNOVAL [Coosemans et al., 1988]. L'abandon par TEKTRONIX de ses terminaux graphiques "intelligents" et les difficultés d'INNOVAL après le décès subit de son dirigeant ont motivé un nouvel appel d'offre en 1992, remporté par la firme belge STAR.

Dans l'interaction avec les autres services, beaucoup de difficultés sont venues du fait que bien des respon-

■ ■ ■

■ ■ ■ sables et dessinateurs qui avaient fait le pas vers le DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) restaient routinièrement dans le concept "dessin feuille à feuille" et n'étaient pas enclins à faire celui vers le concept SIG - avec sa représentation continue de l'espace sur l'ensemble du site et ses bases de données internes ou annexes. La perspective du projet LHC puis le début de sa réalisation ont poussé à nouveau vers des changements, et il était important d'accompagner cette dynamique d'évolution par une restructuration des données du SIG et par la mise en œuvre de moyens d'usage plus simples et plus performants, afin d'en faciliter la pratique à toutes les catégories d'utilisateurs.

D'autre part, dans l'environnement du CERN, un grand nombre d'applications administratives ou techniques se traitent par des solutions web intégrales, y compris signatures électroniques, dans une démarche "paperless" supprimant toute circulation de papier. Il était donc indispensable que la consultation du SIG puisse se faire aussi en intranet web.

Éléments de projet

■ Objectifs

Les principaux objectifs de ce projet de développement, dans une première phase, se présentent comme suit :

- Consolider la caractérisation de la situation actuelle du SIG du CERN, notamment en ce qui concerne les différents objets géographiques déjà implémentés dans la base de données et leur structuration
- Valoriser les données géographiques et alphanumériques existantes
- Garantir la rigueur positionnelle et thématique de chaque couche géographique, en assurant également la consistance de toute l'information géographique existante dans la base de données
- Administrer efficacement les données existantes
- Définir un modèle de données (pour chacune des applications à développer) adapté aux demandes connues des utilisateurs potentiels
- Effectuer une analyse fonctionnelle des différents utilisateurs qui tra-

vailent directement avec ce système dans une perspective intégrée

- Permettre une plus ample ouverture du SIG, afin que d'autres services puissent également mettre à jour des données géographiques
- Énoncer un programme d'implémentation du modèle proposé, en considérant tous les départements engagés dans ce projet de développement

Dans une deuxième phase, le principal objectif concerne la migration de toute l'information géographique existante dans le SIG vers une Base de Données Orientée Objets (BDOO), qui servira de base au développement des applications internes. Cette base de données permettra de gérer aussi bien les procédures liées aux objets que l'intégrité de ceux-ci.

■ Limitations et contraintes

Par l'ancienneté d'organisation des services, leurs choix et leurs habitudes, il existe certaines caractéristiques, notamment au niveau de la qualité de l'information, qui sont le plus grand obstacle à la réalisation du système désiré. Un problème important est lié aux limitations de caractère technologique dans le développement d'applications géographiques. Chacun des départements possède sa propre base de données où sont enregistrées ses données. Bien que la plupart des départements utilisent le Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) Oracle, il n'existe pas un concept de normalisation interne par rapport à ce sujet, et quelques départements utilisent d'autres SGBD.

Cette problématique augmente significativement la difficulté relative à l'implémentation du SIG, dans la liaison entre l'information graphique avec toutes les bases de données alphanumériques disponibles. De la même façon, la difficulté de croisement entre information graphique et alphanumérique, et la dégradation des temps de réponse du système, sont des causes directes d'une sous-utilisation du SIG.

En considérant les limitations exposées ci-dessus, les contraintes de ce projet seront principalement liées aux points suivants :

- Exploitation maximale relativement à tous les croisements de données pos-

sibles

- Réutilisation de ce projet dans toutes les applications SIG à développer dans le futur
- Établissement de concepts de normalisation par rapport à la spécification de données géographiques
- Sensibilisation des départements engagés dans ce projet vers une normalisation des bases de données alphanumériques existantes, qui permettra une plus grande efficacité et potentialité du SIG

■ Identification et domaine d'intervention des différents départements

La structure organique du CERN étant très complexe (division en Départements, eux-mêmes répartis en Groupes et Sections), il n'a pas été possible d'identifier rapidement tous les utilisateurs possibles de ce système. Bien que le SIG ait été employé par quelques départements dans des opérations de consultation, gestion et analyse spatiale au long des 10 dernières années, la plus grande partie des départements n'ont aucune idée des réelles potentialités de cet outil informatique. Il convient donc de procéder à l'inventaire des domaines d'intervention des données produites pour chaque acteur susceptible d'utiliser le SIG. Cet inventaire est présenté dans le Tableau 1.

Cet inventaire préalable est nécessaire car chaque acteur aura des besoins différents, mais sera également un producteur de données pouvant intéresser les autres acteurs du SIG.

■ Détection de procédures internes

La façon la plus indiquée d'évaluer les objectifs d'utilisation qui puissent permettre la construction des applications à développer est réalisée au travers de l'identification et de l'analyse de procédures. Chaque département du CERN utilise, ou peut prétendre utiliser, l'information géoréférencée dans certaines applications. En fait, l'utilisation de ce type d'information n'est pas uniforme dans tous les secteurs internes de l'organisation.

| GRUPE | DOMAINE D'INTERVENTION | PRODUCTION |
|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Cooling and Ventilation | Réseau d'eau potable | Alphanumérique |
| Civil Engineering | Données géologiques | Alphanumérique |
| Facilities Management | Edition et actualisation cartographique et développement du SIG, Bâtiments, Locaux Réseaux d'eau claire et Eau usée | Cartographique Alphanumérique |
| Electrical Engineering | Réseaux électriques et de fibres optiques | Alphanumérique |
| Fire Brigade | Incendie | Alphanumérique |
| Integrity Safety and Environment | Données environnementales | Alphanumérique |
| Radiation Protection | Sources radioactives | Alphanumérique |
| General Safety and Hygiene | Rejets chimiques | Alphanumérique |

Tableau 1 - Domaines d'intervention et Production des Divers Groupes Engagés dans le Projet de Développement du SIG du CERN

Selon Clarke [1991], cette évaluation initiale est importante et doit être le résultat de la compréhension des procédures dans laquelle est enveloppée l'information géographique, notamment en ce qui concerne des questions typiques, comme : qu'est ce qui est utilisé ? Qui utilise quoi ? De quelle façon est-ce utilisé ? Quel est le résultat souhaité ? De façon à satisfaire ces objectifs et dans une tentative de définition généralisée des principales utilisations d'information géographique, les principales procédures internes détectées – qui ont été établies dans les réunions avec les différents départements – sont les suivantes : classification, gestion, intervention, planification, prévention et projet.

Bien que des procédures aient les mêmes dénominations, il est important de remarquer qu'elles peuvent correspondre, selon les utilisateurs, à des actions totalement différentes. Cela signifie que le sens donné au nom de la procédure est spécifique à chacun des services engagés dans ce projet.

■ Définition du travail à effectuer

Après avoir défini les utilisateurs engagés et les procédures existantes, il importe de caractériser avec précision l'utilisation de l'information géographique existante. Une organisation telle que le CERN utilise des données géographiques de natures très diverses, avec un degré d'incidence plus ou moins fort sur son fonctionne-

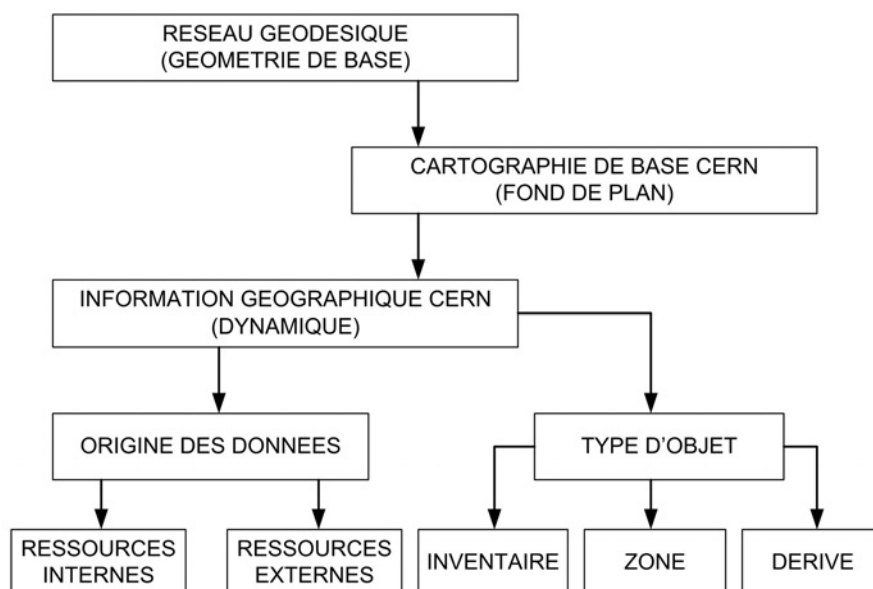


Figure 1 - Classification Proposée pour les Données Géographiques

ment. Cette caractérisation doit permettre de réorganiser la structure de données géographiques, mais aussi d'évaluer les besoins futurs en information géographique à produire, en rapport avec les applications à développer. Elle a été menée en liaison avec les responsables des différents services concernés, afin de satisfaire au mieux leurs besoins.

Nous présentons ici une proposition d'organisation du répertoire de données, selon le travail publié par Matos, [2001]. Cette organisation sera basée sur le but visé pour chaque ensemble de données géographiques (EDG) dans la structure globale du répertoire de données,

comme illustré dans la Figure 1, au détriment d'une classification thématique :

- **RÉSEAU GÉODÉSIQUE (GÉOMÉTRIE DE BASE)** : Réseau géodésique du CERN sur lequel s'appuient les polygones servant aux levés topographiques nécessaires à l'établissement et à la mise à jour du SIG
- **CARTOGRAPHIE DE BASE (FOND DE PLAN) CERN** : Les EDG de Fond de Plan sont les suivantes : Bâtiments, Limites administratives, Routes et chemins, Hydrographie. Elles assurent la rigueur et la consistance positionnelle de tout le répertoire de données géoréférencées
- **INFORMATION GÉOGRAPHIQUE** ■■■

- ■ ■ **CERN (DYNAMIQUE)** : EDG assujettis aux procédés de mise à jour et directement liés aux activités du CERN
- **RESSOURCES INTERNES OU EXTERNES** : EDG acquis ou produits par le CERN, qui constituent un produit terminé et daté, quel que soit le processus de mise à jour. Le résultat final est toujours un nouveau produit (une nouvelle ressource). Quand cet EDG est produit par le CERN, il doit être toujours classifié comme ressource interne. La plupart de ces EDG proviennent de l'Office Fédéral de Topographie (OFT), du plan cadastral genevois (cadastre GE) et du cadastre français (DGI)
- **INVENTAIRE** : EDG constitués par des objets géographiques qui représentent des entités de caractéristiques physiques, biophysiques, fonctionnelles ou structurelles qui se ressemblent. Par exemple, EDG du type Bâtiments,

Réseaux et Espaces Naturels

- **ZONE** : EDG constitués par des surfaces de caractéristiques physiques ou biophysiques similaires ou alors, par des surfaces d'englobement d'études et projets définis ayant en commun des spécifications. Exemple : EDG du type Données Géologiques et Données Environnementales
- **DÉRIVÉ** : EDG résultant de besoins spécifiques, qui se présentent comme ensemble de données dont la relation est éminemment pratique et de caractère empirique

■ Définition des Applications à Développer

Après la caractérisation des acteurs, des procédures internes et des données géographiques, il est possible de définir les applications qui feront le lien entre ces 3 entités. Les diverses applications

devant être développées et implémentées au long des prochaines années sont représentées dans un diagramme de cas d'utilisation (Figure 2).

Mise en place d'une méthodologie de projet SIG

■ Modèle de Données

Définition

La création du modèle conceptuel de données est un pas fondamental dans le développement de n'importe quel système de base de données. Selon le degré mineur ou majeur de perfection avec lequel l'univers modelé est traduit dans le modèle conceptuel, la base de données résultante devra supporter les prérequis actuels de cet univers, et s'adapter aux possibles évolutions de ceux-ci dans le temps. Dans le cas du CERN, la conceptualisation des différents modèles de données à implémenter dans le futur sera menée à partir de nombreuses discussions entre les responsables du développement du SIG et les divers groupes du CERN intéressés par l'utilisation de cet outil informatique.

Ces discussions s'inscrivent dans une démarche itérative visant à définir les spécifications fonctionnelles attendues par les utilisateurs. Elles doivent modéliser le monde réel de la meilleure façon possible, en abordant des questions types, comme celles relatives à l'identification des objets à visualiser, l'interrogation et la visualisation d'objets qui vérifient une condition connue, l'identification de changements (présents et futurs) et paradigmes spatiaux ainsi que la modélisation de phénomènes avec développement spatial.

Application à la Gestion du Réseau de Fibres Optiques

Le type d'information relatif au contenu et structure de données de cette application est conceptualisé à travers un modèle de données conçu en UML [Fowler et Scott, 1998], présenté en Figure 4.

Un catalogue de caractéristiques lui est associé, pour décrire les attributs spatiaux ou non en conformité avec ce même schéma. Le modèle de données présenté

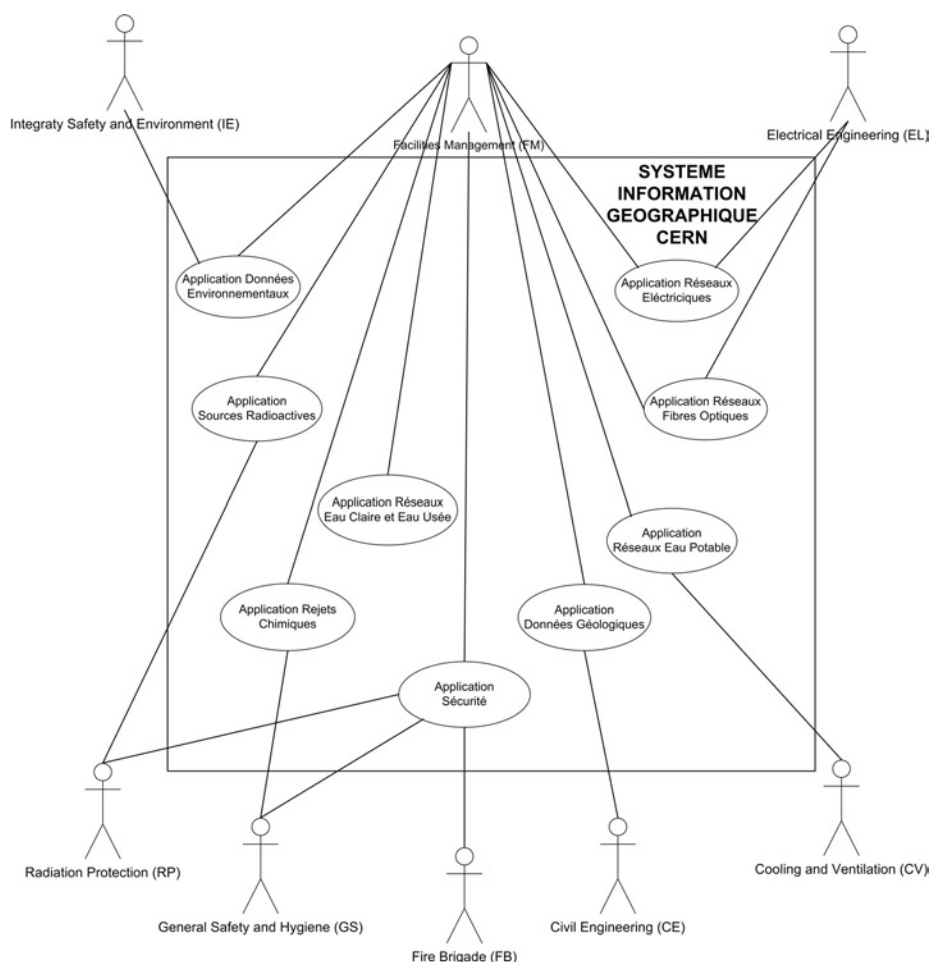


Figure 2 - Diagramme de Cas d'utilisation : Diverses Applications à Implémenter dans les Prochaines Années

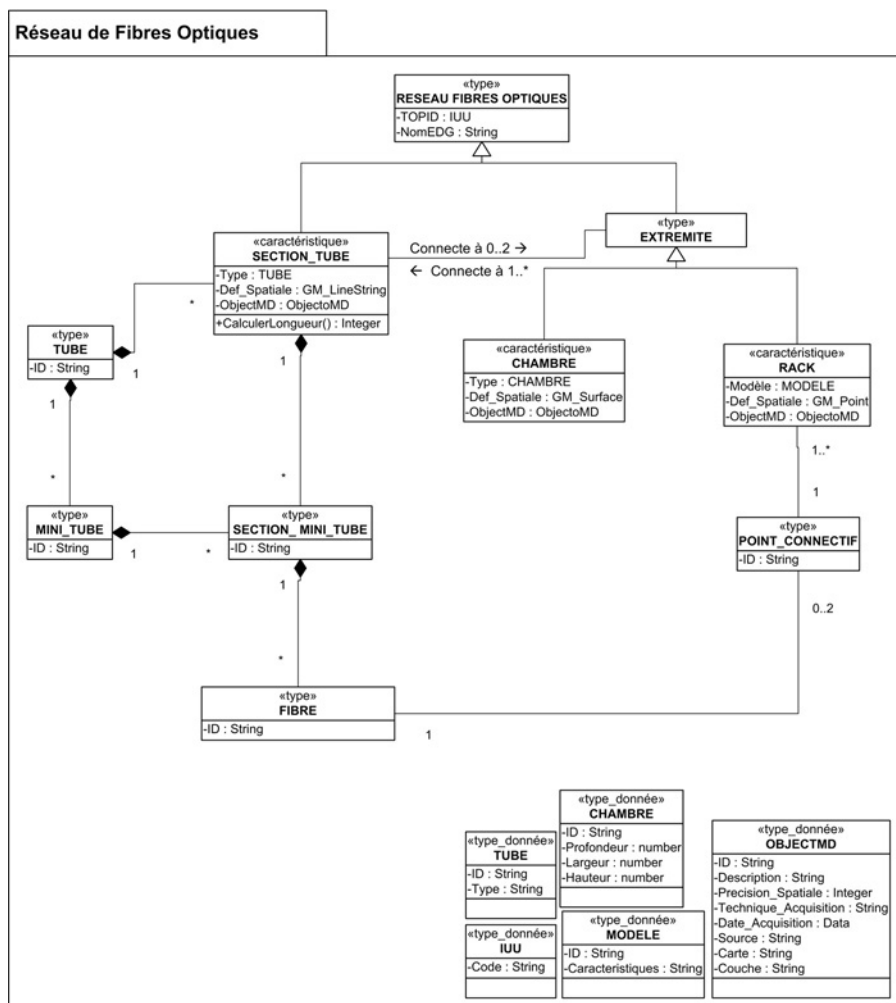


Figure 3 - Modèle de Données pour le Réseau de Fibres Optiques

dans la Figure 3 présente trois "caractéristiques" (entités géographiques) : RACK, CHAMBRE et SECTION_TUBE. Celles-ci définissent des abstractions du monde réel, dont les propriétés incluent attributs, opérations, associations et relations mais aussi diverses propriétés spatiales et descriptives.

Les entités SECTION_TUBE contiennent des SECTION_MINI_TUBES qui à leur tour contiennent des FIBRES. Les concepts de SECTION_TUBE et SECTION_MINI_TUBE sont introduits pour que le modèle reste valable avec les évolutions futures du réseau de fibres optiques. Ainsi, on considère que le long du réseau, un TUBE ou un MINI_TUBE représente, respectivement, l'ensemble total de toutes ses sections de tube ou sections de mini tube. On considère alors que les entités TUBE et MINI_TUBE sont toujours sectionnées dans les nœuds (relatifs aux entités CHAMBRE et RACK) du réseau.

Les CHAMBRES représentent les objets où passent les TUBES au long de son cheminement dans le réseau. Les RACKS se localisent dans l'entrée des divers bâtiments et locaux du CERN. L'origine de toutes ces entités est définie à partir de la classe RESEAU DE FIBRES OPTIQUES, avec un identifiant unique (TOPID) et un nom. Celle-ci généralise les classes SECTION_TUBE et EXTREMITE, qui généralise les classes CHAMBRE et RACK. Les relations de composition illustrent la forte dépendance existante entre les classes TUBE, SECTION_TUBE, MINI_TUBE, SECTION_MINI_TUBE et FIBRE.

■ Structuration des Données

La phase de structuration des données est une étape importante d'un projet SIG. Dans chacun des projets à mener, elle doit :

- Implémenter le modèle de données

conçu auparavant dans les outils disponibles (SIG, SGBD,...)

- Respecter les contraintes du projet (réutilisation, normalisation,...)
- Fournir les fondations pour une administration efficace des données
- Valoriser au mieux toutes les données existantes ou historiques
- Permettre la réalisation des fonctionnalités demandées
- Regrouper les données spécifiques au projet en un seul EDG

La structuration des données étant la réalisation physique du modèle de données, elle découle directement de la conception orientée objet du système, et veut mettre en œuvre le concept de réutilisation. La référence constante à la norme [ISO/19131, 2002] pour identifier les objets de manière claire permet de les regrouper en ensembles relatifs au projet. Ce regroupement en modules ou packages va être réalisé par des EDG. Ainsi, lors d'autres projets, l'identification d'objets existants sera facilitée par la recherche dans chaque EDG.

De plus, comme tous les projets doivent s'intégrer au mieux dans l'environnement technique du CERN, les données alphanumériques (ou attributaires) devront être stockées dans un SGBDR. Oracle étant le plus représenté au CERN, c'est ce SGBD qui stockera les données attributaires. En conséquence, le logiciel de SIG servira à stocker l'information graphique et assurer la bonne gestion des liaisons entre données graphiques et alphanumériques.

Pour ces raisons, l'idée générale qui doit guider la structuration des données est la suivante : un objet du modèle est implémenté par un objet géographique (une couche du SIG) et un objet du SGBD (une table).

Structuration graphique

La composante graphique de chaque objet sera stockée dans une couche avec les primitives graphiques [ISO/19131, 2002] énoncées lors de sa définition (GM_Line, GM_Surface, etc.). Il conviendra de distinguer les données existantes des données créées à l'occasion d'un projet.

Si la structuration des données nouvelles

- ne pose pas de problème, qu'en est-il pour les données existantes ? En effet, celles-ci peuvent être éparpillées dans de nombreuses couches et être structurées différemment, notamment en raison de la méthode d'acquisition de ces données (levé topographique, digitalisation de plans existants, données acquises,...). Cela est un frein à la réalisation du projet.

Cependant, abandonner ces couches "historiques" serait une perte grave d'information. Par exemple, dans le cas de l'application de gestion du réseau de fibres optiques, des données étaient placées dans des couches différentes suivant :

- Leur précision (une couche pour les levés topographiques, une couche pour les réseaux dont la précision géométrique est évaluée,...)
- La notion d'historique (certaines données sur les fibres étaient stockées dans une couche de données de type téléphone car l'affectation de ces équipements a évolué au cours du temps).

Il convient alors de dupliquer ces données dans une seule couche structurée (car elles ne sont qu'un même objet), en les traitant éventuellement afin de respecter la définition de l'objet. Par exemple, des segments seront regroupés en une seule GM_Line si l'objet est de type GM_Line.

Si cela est possible, il est avantageux de profiter de ces traitements pour migrer de l'ancienne structuration des données graphiques vers la nouvelle. Dans le cas contraire, il est primordial d'avoir une liaison entre ces deux structurations de la même donnée géographique. Cette liaison sera expliquée dans la partie Administration des données.

Enfin, ces couches sont regroupées en une carte, qui va constituer l'EDG du projet. Dans le cas du projet de gestion du réseau de fibres optiques, les couches créées (RACK, CHAMBRE et SECTION_TUBE) ont été regroupées dans une carte nommée FIBRE_OPTIQUE.

Structuration alphanumérique

En ce qui concerne la composante attributaire d'un objet du SIG, celle-ci est stockée dans une table du SGBD. Là encore, il convient de différencier les

données existantes des données à créer à l'occasion du projet. En ce qui concerne les données inexistantes, celles-ci seront créées en respectant la règle énoncée précédemment, ce qui ne pose pas de problème majeur. Dans le cas des données existantes, il est indispensable que leur structuration vérifie également cette règle. Pour cela, il convient de les modifier au besoin dans leur organisation, mais jamais dans leur contenu.

La difficulté principale de cette règle réside dans le croisement des données, et plus particulièrement avec celles d'autres groupes et services. En effet, pour des raisons historiques, leur structuration n'est pas conforme à la règle et qui plus est, parfois non conforme au modèle relationnel. Ces données étant gérées par d'autres services indépendamment du SIG, il est impossible de les modifier. Dans ce cas, on applique le principe suivant : lorsque la structure des données de services extérieurs au SIG ne convient pas pour la réalisation d'un projet, une présentation correcte de celles-ci sera créée au travers d'une ou plusieurs structures dynamiques dans le SGBD (dans le cas d'Oracle, des vues). Ces structures seront toujours stockées dans la base de données du SIG. Une fois la structuration initiale des données établies, il est nécessaire de la pérenniser au travers d'une administration efficace.

■ Administration des données

L'administration des données a pour but :

- D'assurer la cohérence des données dans le temps
- D'assurer une structuration correcte des données
- De disposer d'informations sur les données
- D'assurer le lien entre d'éventuelles structurations différentes de la même donnée géographique.

Chaque projet étant basé sur une réflexion orientée objet, il en va de même pour sa partie Administration.

Pour cela, on utilise une Base de Données d'Objets Organisés (BDOO) qui contient :

- La définition des objets et de leurs

caractéristiques (graphiques et alphanumériques)

- Les procédures associées à ces objets
- L'interactivité entre les objets et les utilisateurs (dans une deuxième phase)

Ainsi, en plus des outils d'administration classiques du SIG, cette base va permettre d'écrire éventuellement des routines de contrôle de cohérence puissantes et réutilisables dans de nombreux projets. En effet, celles-ci prendront comme paramètres des objets, et donc iront lire leurs caractéristiques (nom de couche, nom de table, primitive graphique, type de représentation,...) dans la BDOO.

Le fait d'appuyer l'administration sur cette base OO est intéressant car :

- Si une caractéristique d'un objet change, la mise à jour de la BDOO répercute immédiatement ce changement sans avoir à récrire la routine
- Une routine traite un type d'objets, et ce quel que soit le projet considéré. Elle respecte ainsi la contrainte de réutilisabilité transversale à tous les projets

Ainsi, les outils de cohérence et de vérification de la structuration des données sont généralisés au maximum.

De plus, il est nécessaire de disposer d'informations sur les données, ou métadonnées. Là encore, ces métadonnées sont stockées dans le SGBD et retranscrivent la norme [ISO/19131, 2002] sous forme de base de données relationnelle. Pour que leur information soit pertinente, il faut que ces tables soient liées aux objets qu'elles décrivent. Pour cela, on rajoute pour chaque objet un champ dans la table du SGBD contenant les informations alphanumériques de celui-ci. Ce champ va contenir un code qui va assurer la jointure entre la table contenant les données de l'objet et l'enregistrement correspondant dans les tables de métadonnées. Ainsi, en interrogeant dans le SIG un objet graphique (une chambre par exemple), on accède aussi bien à ses attributs qu'aux métadonnées qui lui sont associées.

L'administration doit également permettre de faire le lien entre différentes structurations de la même donnée graphique. Dans le cas de l'application de gestion du réseau de Fibres Optiques, cela était par exemple le cas lorsqu'un

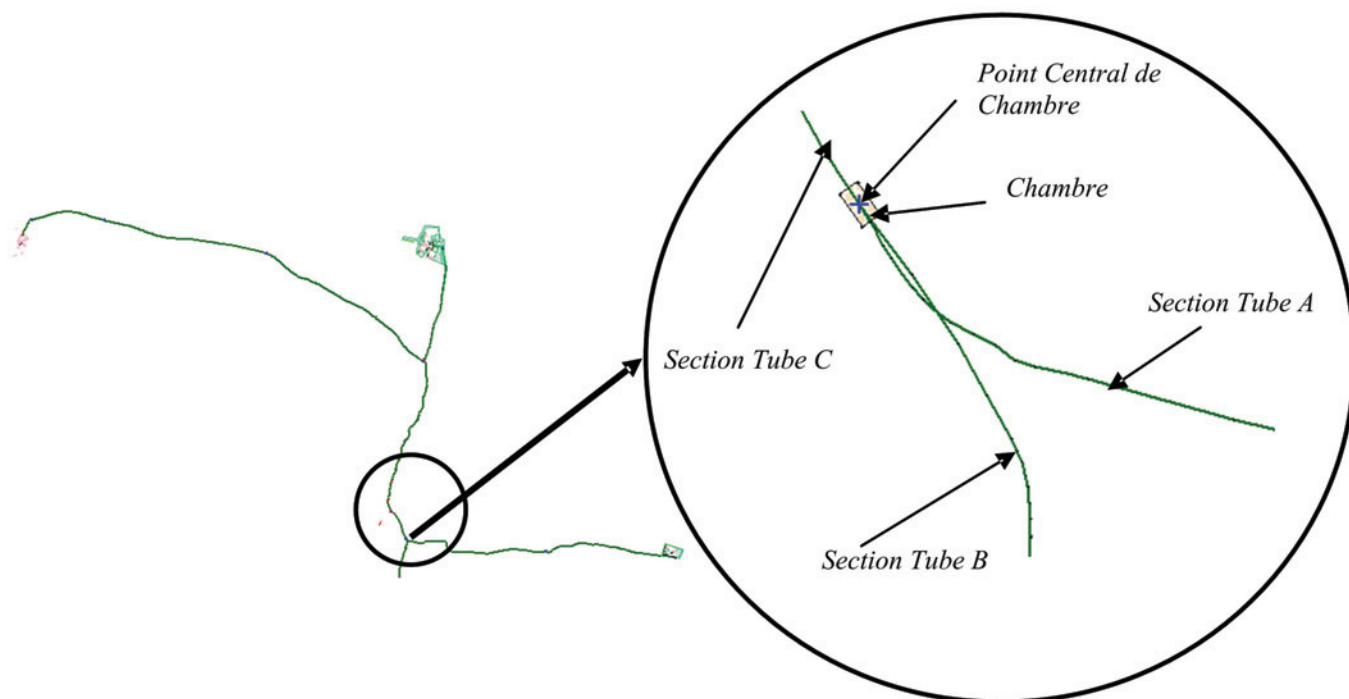


Figure 4 – Plan Général d'une Partie du Réseau de Fibres Optiques du CERN à une Échelle 1/20 000 avec un Exemple de Représentation de Trois Objets Section de Tube et d'un Objet Chambre

tube était auparavant stocké en plusieurs parties dans des couches différentes (tubes et téléphone par exemple) pour des raisons historiques. Dans l'application, ce tube étant un seul objet, il n'était qu'un seul élément graphique, qui était une fusion structurée des divers éléments rencontrés dans les couches "historiques".

La gestion de l'existence de structurations différentes de la même donnée graphique se fait à deux niveaux :

- Le premier, assez rigoureux, et proche du principe de liaison entre les données et les métadonnées
- Le second, plus souple, est basé sur la notion de métadonnée graphique

Pour le premier niveau, on procède de la même manière que pour les métadonnées. Des tables contiennent les différentes combinaisons de couches ayant servi à structurer la donnée, et un code permet de faire la jointure entre ces tables et la table de l'objet concerné. Le deuxième niveau de gestion est basé sur la définition à priori de la représentation graphique de chaque objet. En effet, chaque élément graphique est stocké dans la base des données graphiques avec un type de représentation. Une légende, qui contient la défini-

tion graphique de chacun de ces types de représentation, est ensuite associée aux couches de données pour obtenir la visualisation des données graphiques dans le SIG.

Pour chaque projet, ces différents types sont définis avant toute opération de création graphique. Ils sont alors compris dans une plage de valeurs réservée à un projet. Lors de la conception de ces types, l'administrateur va lister tous les cas possibles d'origine des données (existantes ou non, issues des couches de fibres ou de téléphones,...) et attribuer un type à chacune des combinaisons. Pour tous les types utilisés par un même objet de l'application, la définition de leur représentation graphique est la même. Ainsi, dans l'application, un même objet a toujours la même représentation mais une simple interrogation graphique permet de connaître la source des données.

Au travers de ces deux niveaux de gestion, on arrive à permettre la structuration des données en vue de développer des applications pouvant être complexes pour chaque projet, tout en conservant la richesse historique de la structuration existante, notamment sur les exactitudes de positions.

■ Utilisation

Comme le montre la Figure 2, de nombreuses applications sont à réaliser en gérant un nouveau projet à chaque fois. Pour chacune d'entre elles, l'aboutissement de chaque projet est l'utilisation et l'exploitation des données par les utilisateurs, au moyen de fonctionnalités qui leur sont plus ou moins spécifiques. Ainsi, chaque projet va voir la création de menus spécifiques dans le logiciel de SIG. Ces menus contiennent des outils préparamétrés pouvant être :

- Des requêtes de localisation
- Des requêtes purement alphanumériques
- Des thématiques
- Des analyses spatiales

Dans l'application de gestion du réseau de fibres optiques (Figure 4), ces menus comportaient notamment une requête de détermination de tous les bâtiments non alimentés en cas de coupure d'un tube de fibres optiques, lors de travaux. De plus l'accès aux données est transparent pour l'utilisateur. En effet, l'utilisation de thèmes de données plutôt que de couches permet d'accéder aux données non plus en connaissant les noms et emplacements des couches, mais simplement en ouvrant un thème : ■■■

■■■ fond de plan, chambre, rack, tubes, autres réseaux,... Ces thèmes sont en fait une couche de présentation de la base de données d'objets organisés, qui est ainsi présente dans chaque étape du projet. Elle permet à l'utilisateur de travailler avec ses objets et de gérer ou exploiter son patrimoine sans avoir à se préoccuper de la localisation des données. Par ailleurs, la référence à la notion d'objets permet de respecter l'intégrité des données.

Conclusions

Tout ce travail d'analyse complète du SIG du CERN, de restructuration et de normalisation s'avérerait indispensable non seulement pour épurer et organiser plus rationnellement les données existantes mais surtout pour répondre aux exigences d'une évolution nécessaire, dans la perspective d'un meilleur service aux utilisateurs de toutes sortes.

Les concepts et moyens mis en œuvre devraient maintenant permettre de concevoir et d'ajouter plus simplement les divers applicatifs de gestion ou de consultation que ces utilisateurs ne manqueront sûrement pas de demander, au fur et à mesure de leur découverte et de leur exploitation des multiples vertus d'un SIG pour la gestion du site et du patrimoine. ●

Contacts

Cláudio CARNEIRO

Ingénieur Géomètre au CERN dans la Section Information Site et Patrimoine du Groupe "Facilities Management"
Claudio.Carneiro@cern.ch

Leonel GONÇALVES

Ingénieur Géomètre STAR INFORMATICA SA.
lg@star.be

Bernard GUYOT

Responsable de la Section Information Site et Patrimoine du Groupe "Facilities Management"
Bernard.Guyot@cern.ch

Michel MAYOUD

Chef du Groupe "Métrologie de Positionnement et Topométrie".
Michel.Mayoud@cern.ch

Références bibliographiques

Clarke, A. L. (1991). "GIS Specification, Evaluation and Implementation."
Dans Geographical Information Systems, Publication par D. J. Maguire, M. F. Goodchild et D. W. Rhind, Ed. Longman Scientific & Technical, Vol. I, pp. 477-488, New York.

Coosemans, W. et al., CERN (1988).

Représentation et Gestion d'un Site de Type Industriel par un Système d'Information du Territoire, IMAGICA 88, Lyon.

Fowler, M., et Scott, K. (1998).

UML Distilled : Applying the Standard Object Modelling Language. Ed. Addison-Wesley, Object Technology Series, Essex, United Kingdom.

ISO/19131 (2002). "Geographic

Information - Data Product Specification." ISO/TC 211.

Matos, J. (2001). Fundamentos de

Informação Geográfica. Ed. Lidel, Lisboa, Portugal.

ABSTRACT

Key words : Geographical Data Specification, Object Oriented, Processes Evaluation, Geographical Data Production, Optical Fibres, Metadata Management System

CERN is the world's biggest particle physics laboratory, employing more than 8000 people. CERN's Geographical Information System (GIS) encompasses approximately 1400 hectares, containing 1300 buildings and 70 Km of tunnels along with technical galleries for the accelerators and the experiments, 1000 Km of buried services and a developed built surface area of 500,000 m².

Within a context akin to that of a small town combined with a large industrial complex, the systems for managing and consulting localized data and multiple correlated information must readily adapt to the rapid evolution in information technology which takes place at CERN (where the web was born), whilst providing an high-level of productivity and efficiency expected by the co-producers and users.

This article presents a methodology for developing GIS applications specific to each user group. To achieve the objectives, the ISO/19131 standard and an Object Oriented (OO) approach are adopted. This provides a clearer understanding of the geographical information and allows the concepts related to its use to be harmonized. The example application described, relating to the management of the optical fiber network, meets the objectives of the project and the requirements of the users.

The global objective and hence the aim of the implemented procedures, is to constrain Geographical Information Systems to be developed in a structured, coherent and reusable manner and allow the various internal applications to be integrated in the most universal way possible.

Synthèse sur la concordance des références altimétriques en Baie du Mont-Saint-Michel

■ Christophe MARGUERIT

Cet article fait le point sur la concordance des références altimétriques en Baie du Mont-Saint-Michel. En particulier, il discute du problème de raccordement des zones de marée et de la difficulté de fixer un zéro hydrographique pour l'établissement des cartes marines et des annuaires de marée.

■ mots clés

zéro de référence
zones de marée

Dans le cadre du programme de recherche européen EUROSAM (European Salt-Marshes Modelling), un modèle numérique bidimensionnel de l'hydrodynamique en baie du Mont-Saint-Michel a été développé. Ce modèle, fondé sur les équations de Barré de Saint-Venant (1887), calcule divers paramètres hydrodynamiques tels que la vitesse du courant et la hauteur d'eau. La justesse de ces calculs dépend, notamment, de la précision de la bathymétrie.

Comme toute mesure, la bathymétrie nécessite un zéro de référence. Un lieu donné se trouve à l'altitude z par rapport à un niveau de référence z_0 . A priori, il n'y a pas de raison de choisir un niveau de référence plutôt qu'un autre. Aussi, suivant les époques, en France comme à l'étranger, les niveaux de référence ont varié et il est donc très difficile, par exemple, de comparer des cartes établies à des époques différentes ou provenant de régions du monde différentes.

En France, les niveaux de référence les plus usités ont été suivant les époques et les applications : le niveau des plus basses mers astronomiques, le zéro hydrographique, le niveau moyen de la mer (NM), le zéro du Nivellement Général de la France (N.G.F.) Bourdalouë, le zéro N.G.F. Lallemand (conservé dans le système d'altitude N.G.F.-I.G.N. 69) et le zéro de l'Institut Géographique National (I.G.N.) 69. Actuellement, seuls subsistent le zéro hydrographique, le niveau moyen de la mer et le zéro I.G.N. 69. Le zéro hydrographique et le niveau moyen de la mer sont les références des travaux hydrographiques (bathymétrie des cartes marines, prédiction de la marée,...). Le zéro I.G.N. 69 est la référence du nivellement terrestre en France métropolitaine Corse exceptée.

Les levés bathymétriques existants pour démarrer la modélisation hydrodynamique de la baie provenaient de sources variées (Service Hydrographique de la Marine, Institut

Géographique National, Société Grenobloise d'Étude et d'Application Hydraulique et Laboratoire d'Évolution des Systèmes Naturels et Modifiés de l'université de Rennes 1). A cette variabilité des sources était liée, comme souvent, une variabilité des zéros de références utilisés pour les mesures. Or, il n'existait jusqu'alors aucun document de synthèse rattachant de façon précise les différentes références altimétriques, terrestres ou marine, au zéro hydrographique en Baie du Mont-Saint-Michel [2]. C'est la raison pour laquelle notre bibliographie se limite à cinq rares documents utilisables, le reste relatant de communications personnelles.

Il résultait de cet état de fait que dans la pratique, les différents auteurs s'arrangeaient de façon empirique pour qu'il n'y ait pas de discontinuité lorsqu'ils utilisaient des données référencées à des zéros altimétriques différents. Aussi, à cause de la sensibilité des écoulements à la forme des bassins, il a été nécessaire d'établir une échelle de concordance précise des références altimétriques en Baie du Mont-Saint-Michel.

Cette synthèse rappelle la définitions des différentes références altimétriques terrestres et marines en les rattachant chaque fois au zéro hydrographique. Elle s'attarde particulièrement sur le problème de l'établissement d'un zéro hydrographique.

Les zéros marins

■ Le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques

Le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques sont deux références intimement liées.

Le niveau des plus basses mers astronomiques est le niveau théorique de l'eau qu'on observerait à basse mer pour la plus forte marée de vive-eau extraordinaire d'équinoxe. En d'autres termes, c'est le niveau théorique en dessous duquel l'eau ne descend qu'exceptionnellement sous l'influence de conditions météorologiques extrêmes (dépressions, etc.).

Le zéro hydrographique, également appelé (en France) zéro du service hydrographique ou zéro des cartes marines, est le niveau de référence commun aux cartes marines et aux annuaires de marée. Lors des premiers nivellements terrestres, il a été utilisé comme niveau de référence.

Selon une recommandation de l'Organisation Hydro-

■ ■ ■ graphique Internationale (O.H.I.), le zéro hydrographique devrait être choisi au voisinage du niveau des plus basses mers astronomiques. Ce choix arbitraire est commode car le marin est pratiquement assuré de disposer d'au moins autant d'eau que ce qui est indiqué sur la carte. Cette préconisation est adoptée depuis peu par les pays membres de l'O.H.I. à l'exception du Japon. Toutefois, dans les faits, sa traduction risque de prendre du temps car de très nombreuses cartes sont à refaire. Ainsi, niveau des plus basses mers astronomiques et zéro hydrographique devraient être deux références d'altitude très proches. Pourtant, il peut exister des différences significatives, parfois de quelques dizaines de centimètres (ex : 40 cm à Calais) entre ces deux niveaux. L'écart s'explique de part la méthode utilisée pour fixer le zéro hydrographique. En effet, le zéro hydrographique d'un lieu est déduit pratiquement de l'analyse harmonique des variations de hauteur d'eau mesurées (marégraphie) en ce lieu pendant une période finie. Cette analyse donne les valeurs des différentes composantes de la marée au port d'observation.

D'après l'O.H.I., pour retenir la hauteur de la plus basse mer, l'idéal serait d'effectuer une prédiction de hauteur d'eau sur une période de 19 ans connaissant ces composantes. Ceci repose sur l'idée répandue que la marée est un phénomène à peu près périodique de période égale à 18,61 ans, période proche de la période chaldéenne (encore appelée Saros)

égale à 18 ans de 365 jours et 15,5 jours. Cette idée est fautive car la situation des astres au bout de chaque période chaldéenne n'est pas strictement la même. Il est donc impossible de prétendre que sur une période finie, quelle qu'elle soit (inférieure ou supérieure à 18,61 ans), on aura observé le niveau des plus basses mers ou des plus hautes mers astronomiques. En d'autres termes, pour que l'écart observé entre le niveau des plus basses mers astronomiques et le zéro hydrographique tendent vers zéro, il faudrait avoir en chaque port des mesures marégraphiques sur une période tendant vers l'infini. Ceci, bien évidemment, est impossible. Il faut donc, si l'on suit les recommandations de l'O.H.I., accepter une certaine imprécision qu'il est difficile de chiffrer (Simon B., 2001a).

Pratiquement, jusqu'alors, les zéros hydrographiques ont été fixés une fois pour toute, à une époque donnée, d'après des observations marégraphiques portant sur des périodes variables suivant les ports, mais si possible au moins égales à l'année. Une fois fixé le zéro hydrographique d'un port est en général conservé même si les observations et/ou les calculs ultérieurs montrent qu'il n'était pas le niveau des plus basses mers. C'est pourquoi il existe des écarts entre le niveau des plus basses mers astronomiques et le zéro hydrographique. Ces écarts varient lentement dans le temps et d'un port à l'autre à mesure que de nouvelles observations viennent préciser la valeur des composantes de la marée et ainsi affiner les prédictions sur le niveau des plus basses mers astronomiques. Exceptionnellement, lorsqu'un écart trop important entre zéro hydrographique et niveau des plus basses mers astronomiques est observé, on réajuste localement le zéro hydrographique. C'est ce qui s'est produit à Brest et à Saint-Nazaire en 1996 où les zéros hydrographiques ont été respectivement rehaussés de 0,50 mètres et abaissés de 0,40 mètres.

A ce premier problème vient s'ajouter celui de la concordance entre les zéros hydrographiques de ports voisins, déterminés à des époques souvent différentes et sur des périodes d'observations marégraphiques différentes. Ce second problème a conduit les hydrographes des années soixante à introduire une nouvelle notion : la zone de marée. Une zone de marée est une région géographique restreinte, liée à un port de référence pour lequel le zéro hydrographique a été fixé comme on l'a vu précédemment. Pour chaque zone de marée, on fixe et on considère géographiquement constant, l'écart entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques. Par exemple, la baie du Mont-Saint-Michel dépend de la zone de marée dont le port de référence est Saint-Malo. Pour l'ensemble du golfe Normand Breton, et donc la baie du Mont-Saint-Michel, l'écart entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques est estimé à 0,21 mètres (figure 1). Mais il apparaît immédiatement, au vu de la façon dont on été déterminés les zéros hydrographiques des ports, qu'il peut exister des discontinuités entre chaque zones de marée. C'est effectivement le cas. Ainsi, dans la pratique, pour assurer la continuité des fonds d'une carte qui chevauche plusieurs zones de marée discontinues,

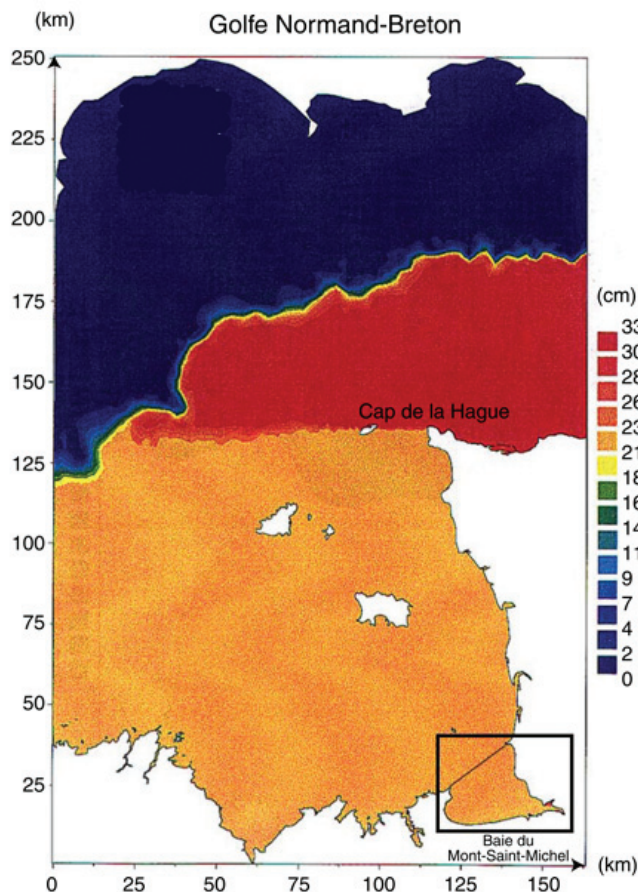


Figure 1

les cartographes s'arrangent empiriquement pour que cela ne se voie pas trop [7]. Toutefois, Bernard S. [6] propose une méthode alternative plus rigoureuse et plus simple à mettre en œuvre pour déterminer non seulement le niveau des plus basses mers astronomiques, mais aussi celui des plus hautes mers et des pleines et basses mers de vive-eau moyenne. Cette nouvelle méthode devrait permettre de supprimer la notion de zones de marée.

■ Le niveau moyen de la mer

Pour comprendre ce qu'est le niveau moyen de la mer, il faut distinguer la marée de la variation de hauteur d'eau réelle qui entrent toutes deux dans son estimation.

La marée est la part de la variation de la hauteur d'eau due uniquement à l'attraction des astres, essentiellement la lune de par sa proximité et le soleil de par sa masse [1]. Elle est prédite, en France, par le Service Hydrographique de la Marine (S.H.O.M.), à l'aide de deux méthodes : la méthode harmonique [4] et la résolution des équations de Navier-Stokes (Navier, 1821 - Stokes 1845).

La variation de hauteur d'eau réelle, observable et mesurable sur le terrain, est la marée corrigée éventuellement par l'influence de phénomènes aléatoires telles que la météorologie, les ondes de tempête, etc.

Le niveau moyen de la mer (NM), est la moyenne des différences entre la hauteur d'eau réelle, et celle due uniquement à la marée, [5] soit

$$NM = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (hr_i - h_i)$$

où m est le nombre de mesures effectuées sur des périodes d'observations relativement longues. NM est donc la moyenne du niveau de la mer s'il n'y avait pas de marée mais simplement une variation de niveau due à l'influence aléatoire des conditions météorologiques. Il correspond donc à une situation moyenne de pression atmosphérique ($\approx 1\,013$ hPa en baie du Mont-Saint-Michel).

Ainsi, NM varie selon les périodes d'observation et la longueur de la mesure. A court terme, on peut observer des variations saisonnières de NM. A plus long terme, le S.H.O.M. a estimé par exemple à 15 centimètres l'augmentation du niveau moyen de la mer à Brest et à Marseille durant le siècle passé, soit en moyenne 1,5 millimètres par an. Mais cette tendance n'est pas continue. Il y eu des diminutions puis des augmentations de niveaux. Les tendances sur dix ans n'ont donc rien de significatif pour le long terme. Les causes de cette augmentation peuvent être multiples : activité anthropique, enfoncement relatif de la croûte terrestre (subsidence), augmentation globale du volume de l'océan, etc.

En baie du Mont-Saint-Michel, NM se trouve 7,58 mètres au dessus du zéro hydrographique (figure 2), soit approximativement le demi-marnage de vive-eau exceptionnelles [3].

■ Les zéros terrestres

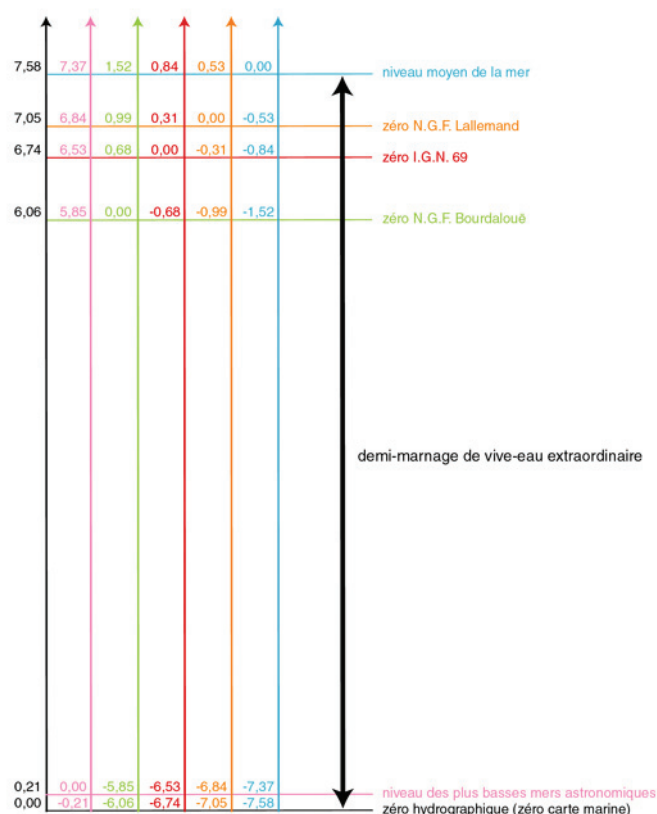


Figure 2

Le zéro N.G.F. Bourdalouë

En 1857, Paul Adrien Bourdalouë, chargé du nivellement général de la France, estime qu'il est nécessaire de disposer d'un niveau de référence identique sur l'ensemble du territoire. Dès 1859, le nivellement des réseaux de base montre que les niveaux moyens de la mer observés dans différents ports de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Océan Atlantique sont plus élevés qu'en Méditerranée. Celle-ci présentant par ailleurs de très faible marnages, il est décidé que le niveau moyen auquel les altitudes N.G.F. devront être rapportées sera celui de la Méditerranée. C'est ainsi que le réseau Bourdalouë est établi par comparaison des différents niveaux moyens de la mer en France de 1857 à 1864.

Le zéro N.G.F. Bourdalouë est officiellement fixé par une décision ministérielle du 13 janvier 1860 comme étant le niveau moyen de la mer à Marseille, c'est à dire la côte 0,40 m de l'échelle des marées en marbre du Fort Saint-Jean. Ce zéro de référence sera utilisé jusqu'en 1890.

En baie du Mont-Saint-Michel, il est situé 6,06 mètres au dessus du zéro hydrographique (figure 2).

Le zéro N.G.F. Lallemant

En 1878, le ministère des Travaux Publics décida de jeter les bases d'un nouveau nivellement de la France destiné à reprendre, vérifier et compléter celui de Bourdalouë. A cet effet, en 1884, était créé le service du Nivellement Général de la France, confié à Charles Lallemant. Le réseau primordial Lallemant a été établi de 1884 à 1892 puis complété par celui

- ■ ■ d'Alsace-Lorraine (1920-1922) et enfin par celui de Corse (1926-1931). Les cotes y sont calculées en système orthométrique.

Le zéro N.G.F. Lallemand, dit "Zéro Normal", a été fixé à partir d'observations marégraphiques exécutées à l'observatoire marégraphique situé à l'anse Calvo à Marseille Lallemand d'après des observations du marégraphe du Fort Saint-Jean de Marseille pendant la période du 1^{er} février 1885 au 1^{er} janvier 1897. Ces observations ont permis de fournir un zéro correspondant à la cote 0,329 m de l'échelle de marée du fort St-Jean ; il se trouve donc à par Charles. Il correspond à la côte 0,329 m du marégraphe, soit 71 millimètres en dessous du zéro N.G.F. Bourdalouë. Ce zéro de référence remplace en 1890 le zéro N.G.F. Bourdalouë. Il sera utilisé jusqu'en 1969. Les altitudes sont exprimées dans le système orthométrique.

En baie du Mont-Saint-Michel, le zéro N.G.F. Lallemand est situé 7,05 mètres au dessus du zéro hydrographique (figure 2).

Le zéro N.G.F.-I.G.N. 1969

Le réseau primordial I.G.N. 69 a été établi de 1962 à 1969 par l'I.G.N.. Les altitudes y sont exprimées dans le système normal. Ce réseau a conservé au départ le zéro de référence N.G.F. Lallemand. Il est actuellement le réseau de nivellement terrestre officiel en France métropolitaine à l'exclusion de la Corse.

Le calcul dans le système orthométrique des altitudes du réseau N.G.F.-I.G.N. 69 montre, en conservant le même point de départ à Marseille, que la différence entre ces altitudes et celles du réseau N.G.F. Lallemand croissait du sud au nord pour atteindre 60 cm à Dunkerque. En revanche, le calcul des altitudes du réseau N.G.F.-I.G.N. 69 dans les systèmes orthométrique et normal montre un écart n'atteignant que quelques cm et ce en zone de montagne. L'écart entre les deux systèmes d'altitudes N.G.F.-Lallemand et N.G.F.-I.G.N. 1969 est donc très peu lié au changement de type d'altitude mais provient de l'évolution des méthodes opératoires, instrumentales, et de calcul.

Le réseau I.G.N. 69 est régulièrement recalculé (calcul de compensation). Ainsi, les cotes des repères de l'I.G.N. 69 par rapport au Zéro Normal peuvent avoir été modifiées depuis la première détermination de l'altitude des repères en 1969. En baie du Mont-Saint-Michel, le zéro I.G.N. 69 est situé 6,74 mètres au dessus du zéro hydrographique (figure 2).

Conclusion

L'échelle de concordance des références altimétriques proposée dans cette synthèse est actuellement utilisée avec succès par les équipes de recherche françaises travaillant en baie du Mont-Saint-Michel. Elle n'est valable que pour la zone de marée dont le port de référence est Saint-Malo. A long terme, elle pourrait être réajustée en fonction de l'évolution du niveau de la mer, si une référence altimétrique nouvelle n'est pas définie d'ici là. ●

Remerciements

Merci à Monsieur Bernard Simon de l'Établissement Principal du Service Hydrographique de la Marine pour ses conseils et la relecture du présent article.

Christophe MARGUERIT

Muséum National d'Histoire Naturelle - Département Milieux et Peuplements Aquatiques.

Références

- [1] **Courtier M. A.**, Marées, Éditions du Service Hydrographique de la Marine, (1938), 284 p.
- [2] **Le Rhun J.**, Communication personnelle, Institut Géographique National, Paris, (1999).
- [3] **Pineau M.L.**, Courants de marée dans le golfe Normand-Breton, Rapport d'étude n° 008/97, Éditions du Service Hydrographique de la Marine, (1997), 88p.
- [4] **Service Hydrographique de la Marine**, Table des marées des grands ports du monde, 540-MJA, Éditions du Service Hydrographique de la Marine, Paris, (1982), 186p.
- [5] **Service Hydrographique de la Marine**, Communication personnelle, (2000).
- [6] **Simon B.**, Niveaux caractéristiques et coefficient de marée - Calcul direct à l'aide des constantes harmoniques, Rapport d'étude n° 001/01, Éditions du Service Hydrographique de la Marine, (2001a), 30p.
- [7] **Simon B.**, Communication personnelle, Établissement Principal du Service Hydrographique de la Marine, (2001b).

Abstract

Key words : altimetric references/tidal zones

This article looks at the concordance between the altimetric references of the Mont-Saint-Michel Bay. It discusses more particularly the problem of levelling tidal zones and the difficulty to fix a hydrographical zero to establish marine maps and tide-table.

Quelques réflexions sur la réfraction d'un rayon lumineux dans l'air

■ Robert VINCENT

La Terre est entourée d'une atmosphère qui, comme tout milieu transparent, est caractérisée par un indice de réfraction.

Cet indice varie d'un point à un autre, suivant divers paramètres et, du fait de ce gradient, les rayons lumineux qui traversent l'atmosphère sont très légèrement courbés. La propagation rectiligne de la lumière n'est rigoureuse que dans un milieu d'indice constant, comme le vide. Les sciences, telles l'astronomie, la géodésie ou la topographie, tiennent compte nécessairement de ce phénomène, et nous allons en exposer ici quelques facettes.

En particulier, pour démontrer la courbure d'un rayon lumineux traversant un milieu transparent non homogène, et contrairement à de nombreuses théories qui s'appuient toutes sur la loi de la réfraction de Snell-Descartes, nous présentons ici un raisonnement qui part du principe de Fermat et qui nous semble original.

■ mots clés

Indice de réfraction de l'air, gradient d'indice de réfraction de l'air, courbure d'un rayon lumineux dans l'atmosphère, Pierre de Fermat, réfraction atmosphérique et réfraction astronomique, le rayon vert.

Indice de réfraction de l'air

L'indice de réfraction de l'air n est légèrement supérieur à 1. L'excédent à l'unité ($n-1$), est proportionnel à la densité de l'air Δ qui elle-même est fonction de la pression barométrique P , principalement tributaire de l'altitude, et de la température T , également tributaire de l'altitude mais qui varie aussi suivant la saison et l'heure dans la journée.

Une approche de la relation entre ces trois variables n , P et T , est donnée par la loi de Mariotte sur la compressibilité des gaz, si tant est que l'on puisse assimiler l'air à un "gaz parfait" :

$$PV = RT$$

formule dans laquelle V est le volume occupé par une certaine quantité de gaz à la pression P et à la température T et où R est une constante.

L'excédent à l'unité ($n-1$) de l'indice n de réfraction de l'air, est proportionnel à la densité de l'air, donc inversement proportionnel à V

$$n-1 = P/kT$$

L'excédent à l'unité de l'indice de réfraction de l'air ($n-1$), est proportionnel à la pression P et inversement proportionnel à la température absolue T ($= t + 273^\circ$, 15).

Gradient vertical d'indice de réfraction

Dans l'atmosphère, la pression et la température varient avec l'altitude H . En un point, la pression et la température présentent un gradient généralement vertical : dP/dH et dT/dH .

Il s'ensuit qu'en ce point, l'indice de réfraction présente, lui aussi, un gradient vertical dn/dH .

Les dérivées logarithmiques des termes de la dernière formule donnent la relation :

$$dn/(n-1) = dP/P - dT/T$$

d'où : $dn/dH = (n-1) (dP/dH/P - dT/dH/T)$

L'équation de l'équilibre barométrique donne d'autre part :

$dP/dH = g \Delta$ (masse volumique de l'air avec g accélération de la pesanteur)

d'où : $dn/dH = (n-1) (-g \Delta/P - dT/dH/T)$
d'où : $dn/dH = - [(n-1)/T] (g \Delta T/P + dT/dH)$ (1)

Valeur numérique à la pression normale, au niveau de la mer et à la température 0° :

$g \Delta$ = masse volumique de l'air

$= 1,293 \text{ kg/m}^3$

$P = 10332 \text{ kg/m}^2$

$n = 1,000293$

$T = 273^\circ$, 15

$dn/dH = - 0,000001073 (34,18 + dT/dH)$ (2)

avec la constante 34,18 et dT/dH en $^\circ/\text{km}$. Le signe - indique que l'indice décroît généralement avec l'altitude.

Courbure du rayon lumineux dans l'atmosphère

Du fait de ce gradient vertical d'indice de réfraction de l'air, un rayon lumineux qui traverse l'atmosphère est cintré dans son plan vertical. Ceci est vrai même en un point où le rayon est horizontal, plus précisément tangent à une

surface équi-indice. C'est même dans ce cas, qu'il est le plus cintré. C'est assez subtil car, dans un milieu homogène d'indice constant, à gradient nul donc, le rayon ne rencontre là aussi, en tout point de son parcours, qu'un milieu de même indice, mais il est alors rectiligne !

Quelques auteurs admettent ce fait sans en aborder la démonstration. D'autres proposent l'étude d'un rayon lumineux oblique qui traverse des couches d'air d'indice décroissant avec l'altitude, pour en déduire une courbure à l'instar de la succession d'une infinité de petits dioptries. De plus, la courbure de Terre entre alors souvent dans le raisonnement, bien que la courbure du rayon lumineux dans l'atmosphère ne dépende pas de la courbure de l'atmosphère due à la courbure terrestre. La courbure du rayon lumineux serait en effet la même, pour peu que le gradient d'indice soit le même, que ce soit sur une "Terre plate" ou sur une Terre d'un diamètre quelconque. Ces méthodes ne sont pas entièrement satisfaisantes, car elles peuvent laisser penser que la courbure du rayon est liée à la traversée de couches d'indice croissant ou décroissant, alors qu'il n'en est rien comme le prouve l'existence d'une courbure en un point où le rayon est tangent à une surface équi-indice. De plus, elles ne montrent pas clairement qu'en un point, la courbure d'un rayon lumineux n'est due qu'au gradient de l'indice de réfraction qui y règne.

La démonstration qui va suivre, s'appuie sur le principe de Fermat.

Pierre de FERMAT énonça au milieu du XVII^e siècle, cette proposition remarquable : **la lumière, pour aller d'un point à un autre, suit toujours le chemin qui correspond au temps le plus court**, Dans un milieu à l'indice de réfraction variable, ceci ne veut pas dire le chemin le plus court !

James Clerk MAXWELL nous fit comprendre à la fin du XIX^e siècle, que l'indice de réfraction d'un milieu n'est autre que le rapport entre les vitesses de la lumière dans le vide et dans ce milieu. La vitesse de propagation de la lumière est ainsi d'autant plus grande que l'indice est plus faible.

De ces deux propositions, on en déduit une troisième : **un rayon lumineux, dans un milieu à l'indice de réfraction variable, présente une courbure égale à la composante du gradient d'indice, normale au rayon.**

Considérons le cas habituel où dans l'air, l'indice de réfraction diminue avec l'altitude. Entre deux points, la lumière pour aller de l'un à l'autre, ne suivra pas tout à fait la droite joignant les deux points. Elle mettra moins de temps en suivant un arc de cercle supérieur, certes très tendu, et dont le parcours est à peine plus long de la petite différence entre l'arc et la corde, mais qui lui permettra par contre, de traverser des couches d'indice plus faible, donc de parcours plus rapide. En fin de compte, elle mettra le minimum de temps pour joindre les deux points, en adoptant la courbure opti-

male autour de laquelle les variations des gains et pertes de temps dues respectivement à des variations de la vitesse et de la longueur du trajet, se compenseront exactement. C'est ce que nous allons montrer.

■ Disposition géométrique

Soit A et B deux points dans un espace où l'indice de réfraction de l'air n est variable. Soit M le milieu du segment de droite AB où l'indice varie suivant un gradient d'indice G , représenté par un vecteur normal à la surface équi-indice passant par M et orienté vers l'indice le plus élevé. On admettra que l'espace contenant les points A et B est suffisamment petit pour que ce gradient puisse être considéré comme constant.

Plaçons nous dans le plan contenant AMB et le vecteur G issu de M.

Soit un arc de cercle tendu entre ces deux points A et B, du côté où l'indice de réfraction n de l'air est plus faible, et dont la courbure est C (inverse du rayon R). Soit N le milieu de l'arc, et soit m et n des points courants en vis-à-vis sur la droite et sur l'arc.

Soit enfin D la distance entre les points A et B, et Ω le demi-arc AN ou NB et ω l'arc Nn.

Les quantités D/R ou DC sont des infiniment petits du premier ordre.

$\Omega = \text{arc sin } D/2R = \text{arc sin } DC/2$ et en se limitant aux deux premiers termes du développement de la fonction arc sin : $\Omega = D C/2 + D^3 C^3/48$

la longueur de l'arc AB est :

$$2 R \Omega = 2 \Omega / C = D + D^3 C^2/24$$

La longueur de l'arc AB est :

$$D (1 + D^2 C^2/24)$$

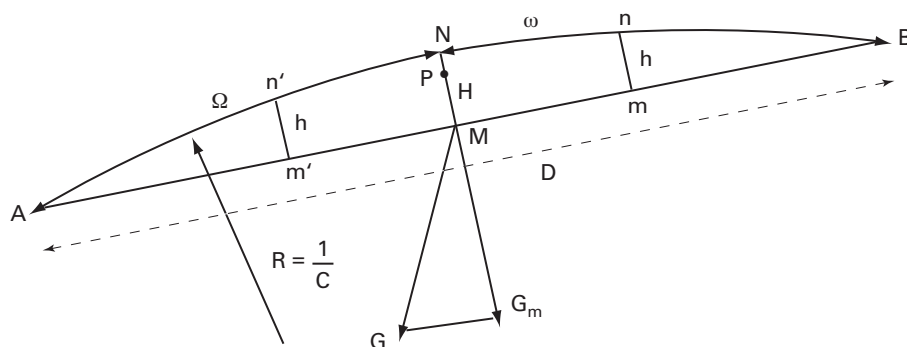
La flèche MN de l'arc est $H =$

$$R - R \cos \Omega \approx R \Omega^2/2 = \Omega^2/2C = D^2 C/8$$

La distance mn entre la droite et l'arc, est $h = H (1 - \omega^2/\Omega^2)$

■ Vitesse de la lumière dans l'espace autour du segment AB

Soit $G_n = dn/dh$ la composante du gradient d'indice de l'air G , normale au segment AB, comptée négativement en allant du segment AB vers l'arc AB, puisque nous nous plaçons dans le cas d'un arc situé du côté de la corde AB où l'indice de réfraction n de l'air est plus faible.



Soit V_m et V_n la vitesse de la lumière respectivement aux points m et n . Suivant **Maxwell**, le rapport des vitesses V_n et V_m , est égal à l'inverse du rapport des indices aux points n et m . Il s'ensuit que sur le segment mn , la composante du gradient de la vitesse de la lumière :
 $dv/dh = -dn/dh = -G_n$.

Les vitesses V_n et V_m sont liées par la relation :

$$V_n = V_m [1 + (dv/dh) h]$$

$$d'où : V_n = V_m (1 - G_n h)$$

$$V_n = V_m [1 - G_n H (1 - \omega^2/\Omega^2)]$$

■ Temps de parcours de l'arc AB, à la vitesse de la lumière

Cherchons à exprimer le temps qu'il faut pour parcourir l'arc AB à la vitesse de la lumière V_n , variable en tous points de l'arc :

$$V_n = R d\omega/dt, d'où :$$

$$dt = R d\omega/V_n, d'où encore :$$

$$dt = R d\omega / (V_m [1 - G_n H (1 - \omega^2/\Omega^2)])$$

et enfin :

$$dt = (R/V_m) [1 + G_n H (1 - \omega^2/\Omega^2)] d\omega$$

On ne peut procéder à l'intégration de cette équation différentielle, en l'état, car, tout comme V_n est variable le long de l'arc AB, V_m est variable le long du segment AB, mais cette fois quasi linéairement en fonction de la composante longitudinale du gradient de l'indice de réfraction G_L . Aussi, à chaque couple de points mn , on peut faire correspondre un couple de points $m'n'$, symétriques par rapport à la flèche MN. Il vient :

$$dt' = (R/V_{m'}) [1 + G_n H (1 - \omega^2/\Omega^2)] d\omega$$

$$dt + dt' = [(R/V_m) + (R/V_{m'})] [1 + G_n H (1 - \omega^2/\Omega^2)] d\omega$$

Entre les indices de réfraction en m , m' et M , on a : $n_m + n_{m'} = 2 n_M$, d'où, si V_M est la vitesse de la lumière en M :

$$1/V_m + 1/V_{m'} = 2/V_M$$

$$dt + dt' = (2R/V_M) [1 + G_n H (1 - \omega^2/\Omega^2)] d\omega$$

et en intégrant maintenant, ω allant de 0 à Ω :

$$t + t' = (2R/V_M) [\Omega + G_n H (\Omega - \Omega^3/3\Omega^2)]$$

Or $t + t' = T_c$ temps de parcours de l'arc à la vitesse de la lumière

$$T_c = (2R \Omega/V_M) (1 + G_n 2H/3)$$

On remarque que l'arc, de longueur $2R \Omega$ est parcouru à la vitesse moyenne V_p vitesse de la lumière régnant au point P , point situé sur la flèche MN, au 2/3 de M

vers N . En effet, $V_p = V_M (1 - G_n 2H/3)$
On a établi ci-dessus que :
 $2R \Omega = D (1 + D^2 C^2/24)$ et $H = D^2 C/8$
 $T_c = D [(1 + D^2 C^2/24)/V_M] (1 + G_n D^2 C/12)$
 $T_c = (D/V_M) (1 + D^2 C^2/24) (1 + G_n D^2 C/12)$
 $T_c = (D/V_M) (1 + D^2 C^2/24 + G_n D^2 C/12)$

On remarque que le temps de parcours est $T_c = D/V_M$ pour $C = 0$ (courbure nulle = segment AB) mais aussi pour une courbure $C = -2 G_n$

■ Trajet suivi par la lumière

Selon **Pierre de Fermat**, la lumière va suivre l'arc dont la courbure C_L rend minimum la durée du trajet T_c . La valeur de C_L est donc celle qui annule la dérivée dT_c/dC :

$$dT_c/dC = (D/V_M) (2 D^2 C/24 + G_n D^2/12)$$

$$dT_c/dC = (D^3/12 V_M) (C + G_n)$$

La lumière suit la ligne de courbure
 $C_L = -G_n$ (3)

Son temps de parcours est $T_{co} = (D/V_M) [1 - (D^2 C^2/24)]$. Le gain de temps, en passant par l'arc au lieu de la ligne droite, est $D^3 C^2/24 V_M$. Or, $D^3 C^2/24$ est l'excédent de longueur de l'arc sur la corde. En suivant l'arc, la lumière gagne le temps qu'elle aurait perdu si elle avait eu la même vitesse que sur la droite.

On retiendra qu'un rayon lumineux, en un point d'un milieu d'indice de réfraction non homogène caractérisé en ce point par un gradient d'indice, est courbé dans un plan parallèle à ce vecteur gradient d'indice, avec une courbure égale à la composante de ce vecteur, normale au rayon, et que la concavité de la courbe est tournée vers l'indice le plus élevé.

On retrouve bien le résultat obtenu par les démonstrations qui s'appuient sur les lois de la réfraction de Snell-Descartes, ce qui montre l'équivalence de ces lois avec le principe de Fermat.

Réfraction atmosphérique

Dans l'atmosphère terrestre, le gradient d'indice de réfraction est généralement vertical. Un rayon horizontal présente alors dans son plan vertical, une courbure C_o égale au gradient dn/dH :

$$C_o = -dn/dH$$

Sur un rayon oblique AB d'angle zénithal z , la courbure est $C = C_o \sin z$ et la distance horizontale entre ces 2 points est $D_o = D \sin z$. L'angle des tangentes au rayon en ces deux points (angle de contingence) est $CD = C_o D_o$, ce qui montre que cet angle ne dépend pas de l'angle zénithal. Il s'ensuit que **l'angle de réfraction d'une visée AB, ne dépend pas de sa pente, mais de la longueur de sa projection horizontale.**

Le rayon de courbure du rayon horizontal R_o , est l'inverse de la courbure C_o .

Nous avons vu que

$$dn/dH = -0,000001073 (34,18 + dT/dH)$$

Dans ces conditions, R_o est en km :

$$R_o = 27300/[1 + (dT/dH)/34,18] \quad (4)$$

Dans les basses couches de l'atmosphère, près du sol, on admet pour valeur moyenne expérimentale du gradient de température, - 11° par km (rayon de courbure 40 000 km env.). Plus haut, si on se trouve dans un air en équilibre adiabatique (sans échange de chaleur), le gradient de température est à peu près constant jusqu'à 11 000 mètres d'altitude et vaut - 6°, 5 par km (rayon de courbure 33 700 km env.). En pratique, le gradient est trouvé expérimentalement de l'ordre de - 4°, 5 à - 5° par km (rayon de courbure 31 400 à 32 000 km)

La courbure du rayon devient nulle (rayon rectiligne) pour un gradient de -34° par km. Au delà, et c'est le cas d'un rayon qui rase un sol surchauffé, le rayon est à nouveau cintré parfois fortement, mais alors vers le haut. C'est le phénomène du mirage. Il est dû à une inversion locale du gradient vertical d'indice, due elle-même à une inversion du gradient de densité de l'air, l'air près du sol étant plus léger que l'air des couches supérieures, car beaucoup plus chaud.

Ces mirages traditionnels sont aussi appelés mirages inférieurs, par opposition aux mirages supérieurs qui se produisent beaucoup plus rarement, quand le gradient de température dépasse les + 110° par km. Ce peut être le cas au petit matin, d'une couche d'air anormalement très froide près du sol, sous une couche supérieure plus chaude. Le rayon lumineux est alors fortement cintré dans le même sens et bien plus que la courbure de Terre, ce qui permet de voir "en l'air" des "oasis" normalement invisibles !

■ ■ ■ Niveau apparent

Dans les basses couches de l'atmosphère, le rayon de courbure d'un rayon lumineux horizontal est, dans les conditions normales, de 40 000 km environ et dans le même sens que la courbure terrestre, soit un peu plus de six fois le rayon de courbure terrestre. Du fait de la seule courbure terrestre, un point situé à la même altitude qu'un observateur, lui apparaît en dessous de son plan horizontal. La réfraction atmosphérique va atténuer cet effet d'un peu moins du sixième de sa valeur en faisant apparaître les objets terrestres plus hauts qu'ils seraient vus sans atmosphère. Cette réfraction, combinée avec la courbure terrestre est bien connue en topographie sous le terme de correction de niveau apparent N_a . D'une façon approchée, un objet terrestre est vu trop bas d'une quantité $N_a = K^2/15,2$ avec N_a en mètres et K éloignement horizontal de l'objet en kilomètres. Il s'agit bien, **quelque soit l'inclinaison de la visée**, de l'éloignement horizontal qui détermine comme dit ci-dessus, l'angle de réfraction.

Dans cette pseudo formule, la courbure de Terre intervient pour $K^2/12,75$ (ce coefficient étant égal au double du rayon de courbure terrestre moyen en milliers de km) et la réfraction, de sens et de signe contraires, pour $-K^2/80$ (ce coefficient étant égal au double du rayon de courbure d'un rayon lumineux horizontal en milliers de km).

C'est avec cette formule que l'on peut savoir à quelle distance, un phare dont on connaît l'altitude, peut être vu en mer.

Réfraction astronomique

La réfraction fait aussi apparaître les objets célestes plus hauts qu'ils ne sont en réalité, et cela d'autant plus qu'ils sont plus près de l'horizon où l'angle dit de réfraction astronomique croît rapidement pour atteindre 34' à l'horizon.

Cet angle de réfraction horizontale de 34' est non négligeable puisqu'il représente plus que le diamètre du Soleil ou de la Lune (32'). Ainsi, quand on observe un coucher de Soleil, on remarque que l'astre n'apparaît plus comme un disque bien rond d'un diamètre de 32' mais très

| hauteur sur horiz | angle zénithal apparent | réfraction astronomique | angle zénithal vrai |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 90° | 0° | 0 | 0° |
| 45° | 45° | 1' | 45° 1' |
| 26° | 64° | 2' | 64° 2' |
| 18° | 72° | 3' | 72° 3' |
| 13° | 77° | 4' | 77° 4' |
| 11° | 79° | 5' | 79° 5' |
| 9° | 81° | 6' | 81° 6' |
| 5° | 85° | 10' | 85° 10' |
| 4° | 86° | 12' | 86° 12' |
| 3° | 87° | 15' | 87° 15' |
| 2° | 88° | 19' | 88° 19' |
| 1° | 89° | 25' | 89° 25' |
| 0° 30' | 89° 30' | 28' | 89° 58' |
| 0° | 90° | 34' | 90° 34' |

nettement en forme d'un ovale. L'aplatissement est très sensible puisqu'il est de 20 %. En effet, quand le bord inférieur apparaît tangent à l'horizon, c'est qu'il est relevé de 34' alors qu'au même instant, le bord supérieur situé 32' plus haut, n'est relevé que de 28'. Le "diamètre vertical" apparent n'est plus que de 26', alors que le diamètre horizontal est toujours 32'.

■ Le coucher des sept Soleils et le rayon vert

On sait que lumière qui nous vient du Soleil n'est pas monochromatique et le spectre du visible est traditionnellement décomposé en 7 couleurs : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge, correspondant à des plages de longueurs d'onde allant croissant de 390 à 700 nanomètres. Or, l'indice de réfraction de l'air, comme de tout autre corps transparent, décroît quand la longueur d'onde augmente. Dans l'atmosphère, comme dans le prisme qui décompose la lumière solaire avec une déviation d'autant plus faible que la longueur d'onde est plus grande, les rayons rouges sont moins déviés que les rayons vert et bleu.

Si l'on veut bien considérer que le Soleil nous apparaît dans la journée comme étant la superposition quasi parfaite de 7 disques, un par couleur du spectre, il n'en est plus tout à fait de même au coucher du Soleil. Si, du fait de la réfraction, tous les disques sont vus plus hauts qu'ils ne le sont en réalité, le disque rouge est le moins relevé des sept, car ses rayons sont les moins réfractés, les moins cintrés dans l'atmosphère. Il est vu plus bas que les autres et se couche

le premier. Puis, en une seconde, le disque orangé et ensuite le jaune, le plus intense, disparaissent à leur tour. Tous les rayons de plus de 560 nanomètres de longueur d'onde sont alors éliminés. Un court instant, restent au-dessus de l'horizon le bord supérieur des quatre autres disques. Le bleu et le violet sont très atténués car diffusés dans l'atmosphère, et on les retrouve dans le bleu du ciel. La couleur verte domine car elle est la plus lumineuse. C'est le fameux **rayon vert**.

L'observation du phénomène nécessite toutefois la réunion de plusieurs conditions : observatoire surélevé, temps calme, atmosphère sèche, coucher du Soleil derrière une arête vive éloignée. Un soir, j'ai eu la chance de bénéficier de ces circonstances, au Sahara algérien, en bordure du Grand Erg occidental. Le Soleil s'est couché derrière l'arête vive d'une grande dune située à 40 km. Le rayon vert intense dura une bonne seconde et finit même en tirant sur le bleu ! ●

Robert VINCENT

Président honoraire de l'Association Française de Topographie

ABSTRACT

The Earth is surrounded with the atmosphere which, as any transparent medium, is characterized by its refractive index. This index varies from one point to another, according to various factors and, due to this gradient, the luminous rays which cross the atmosphere are slightly curved. The propagation of light on a straight line is only to be found in an invariable index medium, such as vacuum. Sciences, among which astronomy, geodesy or topography, cannot avoid taking this phenomenon into account, and some of its aspects are set forth hereafter.

In particular, in order to establish the bending of a luminous ray crossing a non homogeneous transparent medium, and in opposition to many theories which all lie upon Snell-Descartes's law of refraction, we introduce here a demonstration which is based on Fermat's principle and which we consider as innovating.

Les premières déterminations d'altitudes des sommets des Pyrénées

■ Raymond D'HOLLANDER

1. Introduction

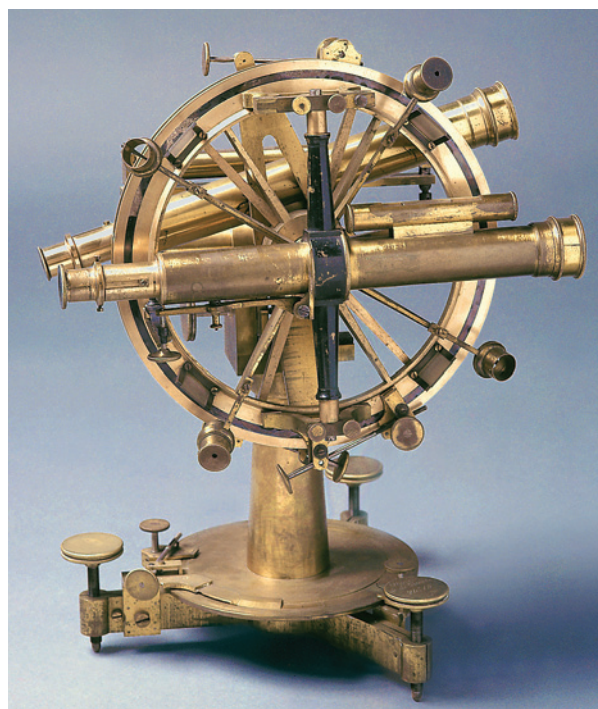
A la fin du siècle des lumières et jusqu'en 1816 on dénombre pour les sommets des Pyrénées :

- des déterminations d'altitudes assez précises mais qui ne seront publiées qu'en 1877,
- des déterminations d'altitudes imprécises, voire mauvaises.

On ne sut qu'en 1817 que le sommet des Pyrénées est le Nethou (Pic d'Aneto), dont l'altitude fut déterminée avec une erreur de 78 m.

Le grand pyrénéiste Ramond avait toujours cru, même après 1817, à la suprématie du Mont Perdu, car il est constitué de calcaires et qu'en principe ceux-ci, roches sédimentaires, se trouvent au dessus des granites et en particulier au dessus de ceux du massif de la Maladetta.

Il faut attendre la triangulation de la chaîne des Pyrénées par les ingénieurs géographes pour connaître après 1827 les premières altitudes précises des grands sommets pyrénéens.



© Menet/IGN, DR

Cercle répétiteur de Gambey n°15, Paris 1825.

2. Procédés utilisés pour la détermination des altitudes

■ 2.1. Le nivellement trigonométrique ou géodésique

Soient deux points A et B dont on veut mesurer la dénivellée dn_A^B . Soit Dh_1 la distance horizontale entre ces deux points, soit i_1 l'angle vertical que fait la visée AB avec la direction de l'horizon. La dénive-

lée entre A et B est (fig. 1) :

$$dn_A^B = Dh_1 \operatorname{tg} i_1$$

Le nivellement trigonométrique comporte deux variantes :

- celui qui est associé à une triangulation (2.1.1.),
- celui qui est effectué en mesurant seulement les angles verticaux sur le terrain et les distances sur une carte (2.1.2.).

2.1.1. Le nivellement trigonométrique ou géodésique associé à la triangulation

Le principe de la triangulation avait été imaginé dès 1533 par le Flamand Gemma Frisius, mais la première triangulation réellement effectuée fut celle réalisée en 1615 aux Pays-Bas par Snellius. Durant près de quatre siècles la méthode de la triangulation

Figure 1

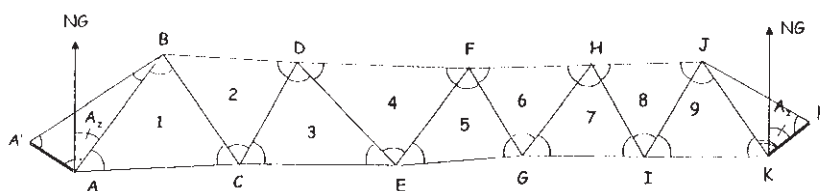
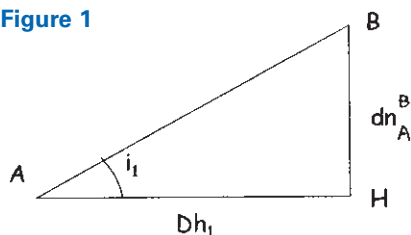


Figure 2 : chaîne de triangulation.

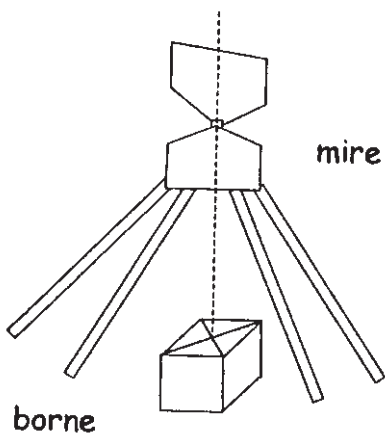


Figure 3

- ■ ■ fut exclusivement utilisée pour établir les canevas des cartes topographiques.

Le principe de la triangulation apparaît sur la figure 2. On recherche dans la zone à cartographier les points hauts, où l'on place des bornes et au dessus de celles-ci on érige des signaux à axe vertical bien défini pour les visées azimutales (fig. 3). Quant aux visées servant à la détermination des altitudes, elles sont faites sur l'un des deux côtés horizontaux des deux panneaux ou à la pointe de ceux-ci. L'axe vertical du signal est centré au dessus de la borne et on centre aussi sur celle-ci un théodolite, avec lequel on mesure les angles horizontaux et verticaux. Sur la figure 2 les angles horizontaux mesurés sont ceux des neuf triangles numérotés 1 à 9 et des deux triangles terminaux AA'B et KK'J. On ne mesure que les longueurs AA'et KK' que l'on appelle *bases géodésiques*.

Dans le triangle AA'B la connaissance de AA' et des angles en A et A' permet de calculer la longueur du premier côté AB. Dans le triangle ABC la longueur AB étant connue, de même que les angles en A, B, C, on peut calculer les longueurs AC et BC. Dans le triangle 2 la connaissance de BC et des trois angles permet de calculer BD et CD, cette dernière longueur servant à calculer les longueurs DE et CE dans le triangle 3 et ainsi de suite... On obtient finalement par le calcul la longueur de la 2^e base (KK')_e. On compare celle-ci à celle obtenue par la mesure directe de KK'. La différence (KK')_e - (KK') doit être faible. L'obtention de cette différence constitue ce qu'on appelle *l'accord des*

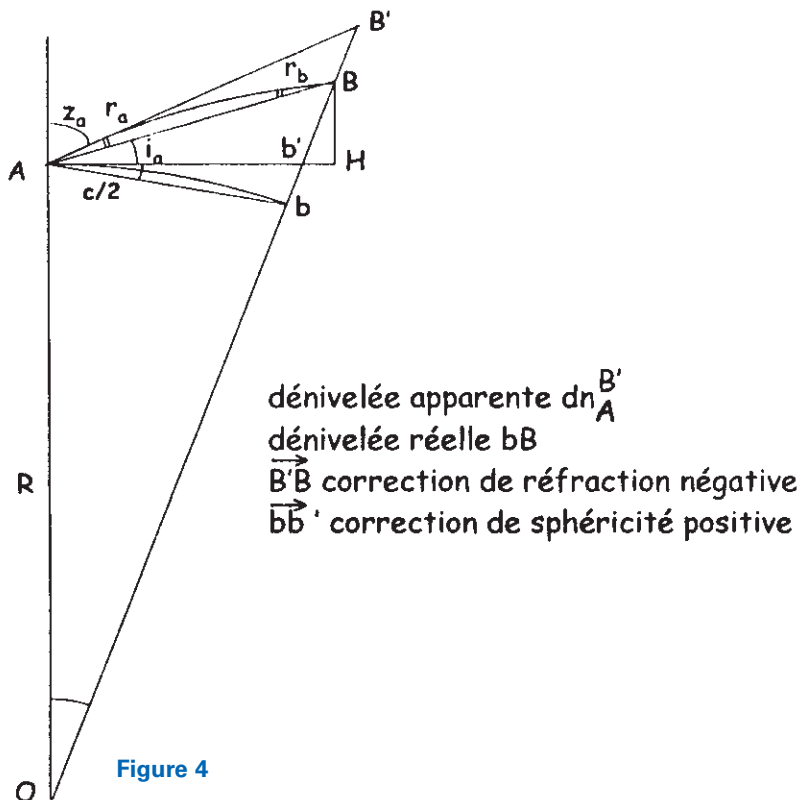


Figure 4

bases. En même temps que l'on mesure les angles horizontaux, on procède à la mesure des angles verticaux, par exemple i_1 pour le côté AB. Si Dh_1 est la longueur de ce côté, on obtient la dénivelée : $dn_A^B = Dh_1 \text{ tg } i_1$. On calcule de même les dénivelées entre B et C, entre C et D, etc. Si on connaît l'altitude du point de départ HA, on pourra en déduire par l'enchaînement AB, BC, CD,... JK l'altitude du point K :

$$(Hk)_e = HA + dn_A^B + dn_B^C + \dots dn_L^K$$

Si on connaît l'altitude H_k du point d'arrivée, on forme la différence :
 $fa = (H_k)_e - H_k$, qui constitue *l'écart de fermeture altimétrique*, qui doit être faible.

Il est préférable d'utiliser l'adjectif *trigonométrique* pour les côtés courts, l'adjectif *géodésique* s'appliquant à des côtés longs, pour lesquels il y a lieu de tenir compte de la courbure terrestre et de la réfraction atmosphérique, qui courbe les rayons lumineux entre A et B. L'angle que fait la tangente à la courbe du rayon lumineux avec la corde correspondante est l'*angle de réfraction* r qui peut varier de façon sensible dans le courant de la journée et sous l'influence des conditions météo-

rologiques ; il croit aussi avec la longueur de la visée. Dans ces conditions, sur la figure 4, le point B est vu dans la direction AB' ; il faut faire une correction négative amenant B'en B, que l'on appelle la *correction de réfraction*.

Si on opère à longue distance, il faut tenir compte du fait que la surface de niveau qui passe par A n'est pas un plan horizontal, mais une surface complexe, que pour simplifier on assimile à une sphère dont le rayon a pour grandeur la valeur moyenne du rayon terrestre : environ 6 400 km. Si la surface de niveau qui passe par A rencontre la verticale de B en b, la dénivellée correcte est bB alors que l'on calcule HB , très proche de $b'B$ (fig. 4), de sorte qu'il faut apporter à la dénivellée HB une correction voisine de bb' , que l'on appelle la *correction de sphéricité*, qui est positive.

Pour s'affranchir autant que possible des aléas de la réfraction atmosphérique, on s'astreint à opérer à des heures comprises entre 10 heures et 16 heures (solaires) en excluant les visées de début de matinée ou de fin d'après-midi. On répartit les observations des angles verticaux sur plusieurs jours et on prend des moyennes. On

montre qu'on améliore la précision des résultats en effectuant des visées réciproques et si possible simultanées.

2.1.2. Le nivellement trigonométrique ou géodésique lorsque la distance est mesurée sur une carte

Pour la détermination des altitudes des sommets des Pyrénées, on a plusieurs fois mesuré les angles verticaux sur le terrain en prenant les distances horizontales : soit sur la carte de Cassini, soit en déterminant la position des points visés à partir des points connus par des observations au graphomètre ou à la planchette. La carte de Cassini est à l'échelle 1 : 86 400, de sorte qu'un millimètre sur la carte représente 86,40 m sur le terrain. La mesure sur la carte se faisant avec une certaine erreur, celle-ci se répercutait sur la mesure de la dénivelée et cela d'autant plus que la visée était plus inclinée.

2.2 Le nivellement barométrique

En 1643, *Toricelli* effectue sa fameuse expérience avec un tube à mercure, expérience connue à Paris en 1644. En 1647, *Pascal* publie ses "Expériences nouvelles touchant le vide". Pour lui, une colonne barométrique d'eau ou de mercure équilibre le poids de l'atmosphère ; partant de ce principe, il conçoit en novembre 1647 sa célèbre expérience du Puy-de-Dôme et il propose à son beau-frère *Périer* de l'exécuter. Il s'agit de vérifier que l'épaisseur de l'air étant moindre, la colonne de mercure montait moins haut au sommet du Puy-de-Dôme qu'à son pied à Clermont-Ferrand.

L'expérience réalisée le 19 septembre 1648 confirme l'hypothèse de Pascal. A Clermont-Ferrand la hauteur du mercure est 26°3'5 soit 71,2 cm, au sommet du Puy-de-Dôme, la hauteur du mercure est de 23°2'0 soit 62,7 cm. Le principe du *nivellement barométrique* était né. Il suffit de mesurer la pression atmosphérique et d'autres paramètres aux deux points A et B dont on veut connaître la dénivelée. A la fin du XVII^e siècle et au cours du XVIII^e siècle on utilisa plusieurs formules donnant la dénivelée en fonction des pressions observées, en attendant qu'au début du XIX^e siècle le grand mathématicien *Laplace* établisse la for-

mule barométrique qui porte son nom. Donnée d'abord avec une certaine valeur d'un coefficient, le fin baromètreur qu'était *Ramond*, le célèbre pyrénéiste, arriva à persuader Laplace qu'il devait modifier le coefficient qui intervenait dans la formule.

Pour obtenir des résultats corrects, il faut s'affranchir des variations de pression dues aux conditions météorologiques. Il ne faut pas opérer ni aux heures matinales ni aux heures de la soirée. Il faut faire les mesures de pression aux points dont on veut obtenir la dénivelée au même instant, ce qui nécessite deux opérateurs opérant simultanément avec deux baromètres différents.

2.3 Le nivellement direct ou de précision

Le nivellement direct, qualifié aussi de géométrique ou de nivellement de précision, comporte l'exécution d'une série de *nivelées* au niveau, telles que celle entre P et Q (fig. 5). A mi-distance de P et Q, on place un *niveau à lunette*, composé essentiellement d'une *lunette* et d'une *nivelles* mobiles autour d'un axe vertical. La nivelles s'apparente à celle d'un niveau de maçon. Lorsqu'on cale la bulle de la nivelles, on rend l'axe optique de la lunette horizontal. Aux deux points P et Q on place des *mires parlantes* comportant des plages centimétriques de couleurs alternées et des graduations décimétriques ; les mires sont dressées verticalement par

des porte-mires. Après avoir calé la bulle, on effectue la visée arrière sur la mire placée en P ; sur le fil horizontal de la lunette on lit la graduation p de hauteur Pp. On tourne le niveau de 180° et on vise la mire avant placée en Q ; après avoir calé la bulle, on lit sur le fil horizontal de la lunette la graduation Q de hauteur Qq. La dénivelée entre P et Q est : $dn_p = Pp - Qq$.

Pour déterminer un ensemble d'altitudes au niveau le long d'un itinéraire, on effectue un *cheminement* comportant plusieurs nivelées telles que celle entre P et Q. On part d'un point A d'altitude connue. On calcule de proche en proche les altitudes des différents points de station des mires... P, Q..., on aboutit à un point B d'altitude connue H_B. La différence entre l'altitude obtenue par le cheminement (H_B)_e et H_B constitue l'*écart de fermeture altimétrique* du cheminement, qui doit être faible.

3. Les déterminations d'altitudes des sommets pyrénéens par les précurseurs

La première mesure de dénivelée au baromètre semble être celle effectuée en 1774 par *Darcet* et *Gaspard Monge* entre le Pic d'Ayré et Luz. La dénivelée obtenue en toises, convertie en mètres, était : 1 708 m.

On note ensuite par nivellement trigonométrique et mesure des distances

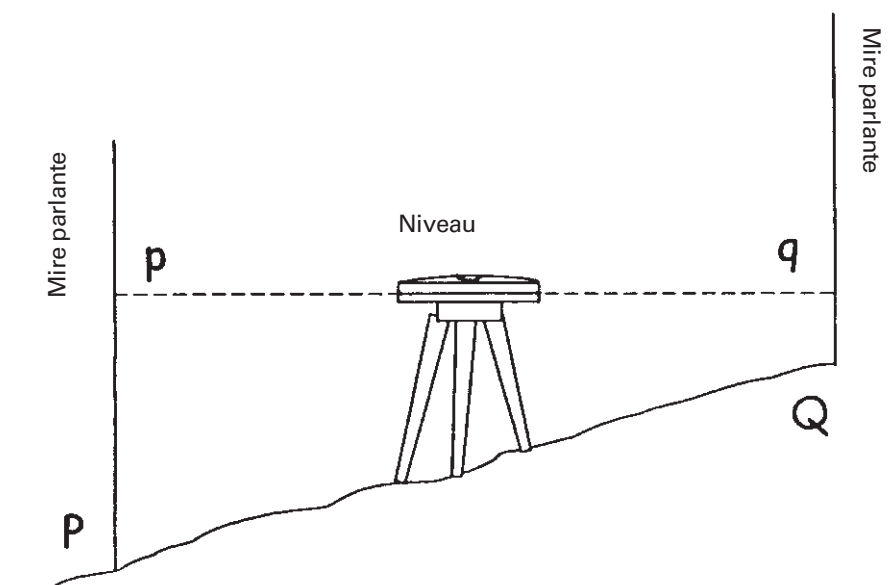


Figure 5

- sur la carte de Cassini (voir 2.1.2) les altitudes suivantes, obtenues en 1775, converties de toises en mètres :
 - pour le Vignemale 3 700 m, au lieu de 3 298 m, par Laroche,
 - pour le Pic du Midi d'Ossau 2 887 m, au lieu de 2 884 m, par Flamichon,
 - pour le Pic du Midi de Bigorre 2 855 m, au lieu de 2 877 m (1), par Flamichon aussi,
 - pour le Canigou 2 813 m, au lieu de 2 784 m, par Rocheblave.

4. Les déterminations d'altitudes des sommets par la Commission de délimitation de la frontière avec l'Espagne de 1786 à 1795

Cette commission était composée de huit Français et de huit Espagnols, dont les chevilles ouvrières pour la détermination des altitudes furent : du côté français l'ingénieur géodésien *Junker* et du côté espagnol le géodésien *Heredia*.

Ces deux ingénieurs étrennèrent un instrument de mesure d'angles horizontaux et verticaux révolutionnaire pour l'époque : *le cercle répétiteur de Borda* (2), qu'utiliseront par la suite *Delambre* et *Méchain* dans les travaux de triangulation de la Méridienne de France, qui ont été à la base du système métrique. Ce cercle répétiteur appelé "cercle entier" par Junker, par opposition aux quarts de cercle utilisés jusqu'alors, comporte deux lunettes et un seul cercle gradué que l'on peut rendre vertical ou placer dans le plan des deux visées faites depuis la station. L'angle de l'espace ainsi mesuré doit être ensuite réduit à l'horizon avant les calculs. Ce cercle permet d'appliquer le procédé de la *répétition*, qui consiste à juxtaposer sur le cercle gradué plusieurs fois l'angle à mesurer, en ne faisant qu'une lecture de graduation initiale et une finale. Avec 10 répétitions on obtient un angle pour lequel l'erreur de graduation du cercle et aussi l'erreur de lecture sont divisées par 10. On conçoit l'amélioration de précision qui en résulte. Les déterminations d'altitudes ont été effectuées par nivellement trigonométrique associé à une triangulation. Les ingénieurs ont pris de grandes précautions pour s'affranchir des aléas

de la réfraction atmosphérique, en effectuant la plupart du temps des visées réciproques, non simultanées, mais à des jours différents aux mêmes heures de la journée. Junker est parti du niveau des marées de vives eaux à St Jean de Luz ; pour comparer les altitudes obtenues aux altitudes modernes il faut tenir compte du décalage entre le niveau des marées de vives eaux et le niveau moyen de l'Atlantique par rapport auquel se rapportent les altitudes actuelles. En convertissant les toises en mètres et en tenant compte de ce décalage, on observe des résultats assez précis dans le Pays Basque. Les écarts se situent entre 0 et 5 mètres sauf en ce qui concerne le Mendaour pour lequel l'écart est de - 11 m et le Mendilaz pour lequel l'écart est de + 9 m.

Les résultats deviennent moins précis au fur et à mesure que l'on s'écarte de l'Atlantique. Dans la zone comprise entre la limite du Pays Basque et le Mont Perdu la plupart des écarts sont compris entre 0 et 10 mètres, avec toutefois - 14 m pour le Pic d'Anie, 72 m pour le Vignemale et 81 m pour le Pic du Midi de Bigorre. On se perd en conjectures sur les raisons de ces deux importants écarts : fautes de calcul ? fautes de report des altitudes dans la publication qu'en a faite le capitaine du génie *Prudent* dans l'*Annuaire du Club Alpin* de 1877 ? Les altitudes ont été portées sur une carte de "Construction à l'échelle du 1 : 200 000 de la triangulation exécutée de 1786 à 1795 sur la frontière des Pyrénées par les ingénieurs géographes des Camps et Armées". Les travaux de terrain furent interrompus en 1793 par la chute de *Robespierre*. Prévus tout le long de la chaîne des Pyrénées, ils s'arrêtèrent dans la région du Mont Perdu. La commission fut dissoute en 1795 et les altitudes obtenues ne furent publiées qu'en 1877, donc 82 ans plus tard.

5. Les déterminations d'altitudes des sommets pyrénéens par Vidal et Reboul de 1786 à 1816

En 1790 *Vidal* (3) et *Reboul* (4) publient dans les "Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Toulouse" un article intitulé "Exposition d'un nivelle-

ment fait dans les Pyrénées pendant les mois de Juillet et Août 1787". Ils y exposent les opérations de nivellement direct au niveau effectuées entre le château de Sarniguet à 10 km au nord de Tarbes et le Pic du Midi de Bigorre, "embrassant un espace vertical" de 2 670 m sur une "ligne horizontale" de plus de 78 km, de façon à réaliser une "montagne graduée" permettant de déterminer la hauteur des lieux par simples observations "barométriques". La méthode utilisée s'apparente à celle décrite dans 2.3 pour un *cheminement*, mais en fait il s'agit de ce qu'en topométrie on appelle une *antenne*, car il n'y a pas de fermeture altimétrique. Les auteurs indiquent qu'ils faisaient leurs observations sur les mires parlantes avec deux "niveaux" identiques placés entre les mires et en contrôlaient au fur et à mesure les résultats. Ils continuaient lorsque ceux-ci concordaient aux erreurs d'observation inévitables près et recommençaient leurs observations dans le cas contraire. Dans la dénivelée entre Sarniguet et le Pic du Midi l'écart entre la dénivelée totale de Reboul et celle de Vidal, convertie en mètres, est de 0,47 m, ce qui peut laisser croire à des observations assez précises, compte tenu de la longueur de l'antenne : 78 km. En fait, l'erreur sur cette dénivelée est de 48,5 m ce qui est considérable pour un nivellement considéré comme de précision. La cause de cette grossière erreur semble provenir des "niveaux". Ceux-ci, construits par Vidal, étaient des instruments composites, pouvant par rotation de la lunette dans un plan vertical mesurer aussi des angles verticaux ; c'étaient donc des *niveaux-éclimètres* dont le réglage devait être difficile.

Dans une note de bas de page ils indiquent : "*ce n'est pas à la vallée d'Aran qu'appartiennent les sommets les plus élevés* (5), *comme l'attestent quelques voyageurs*". Ils concluent leurs notes par : "*enfin que celui qui domine toute cette partie de la chaîne : le Mont Perdu ne surpasse le Pic du Midi que de 153 toises*", soit 298 m (en fait l'écart est de 479 m).

- En 1789 Vidal calcule les altitudes des plus grands pics pyrénéens. Pour le

sommet des Pyrénées, il y a doute entre le Mont Perdu et la Maladetta, le Posets est 3°, le Vignemale 4°.

- En 1817 Reboul seul publie dans les *Annales de chimie et de physique* un article de 26 pages intitulé "Nivellement des principaux sommets de la chaîne des Pyrénées". Il utilise le procédé de nivellement trigonométrique décrit en 2.1.2. Les distances horizontales sont arrondies à la centaine de toises la plus voisine, l'erreur sur la distance est donc au plus de 50 toises soit 97,45 m. Pour une visée de pente 10 % l'erreur correspondante sur la dénivelée est 9,7 m. L'article donne les résultats obtenus pour 51 sommets.

Le sommet du Pic du Midi a pour altitude 1 493 toises soit 2 909 m, d'où une erreur de $2\,909 - 2\,877 (6) = 32$ m. Cette altitude de 2 909 m est obtenue de la façon suivante :

- 1) Reboul part de l'altitude d'un bief du canal du Midi situé à Toulouse, altitude déterminée avec précision par les ingénieurs de Riquet par rapport à la Méditerranée ;
- 2) à cette altitude il ajoute, d'une part la dénivelée entre le bief du canal du Midi et Sarniguet déterminée au baromètre avec une erreur de - 10,5 m, d'autre part, la dénivelée entre Sarniguet et le Pic du Midi, fautive de + 48,5 m comme nous l'avons vu ci-dessus. Dans la somme de ces deux dénivelées, il y a compensation, ramenant l'erreur à : $+ 48,5 - 10,5 = 38$ m ;
- 3) Reboul a l'idée saugrenue de faire intervenir la dénivelée entre le Canigou et le Pic du Midi mesurée depuis Toulouse avec des visées de plus de 100 km de long ;
- 4) Reboul fait intervenir une altitude obtenue à Tarbes ;
- 5) Il effectue enfin une sorte de moyenne pondérée de tous ces résultats donnant finalement au Pic du Midi une altitude fautive de 32 m ; la chance a voulu que les opérations 3) et 4) ramènent l'erreur de 38 m à 32 m.

Voici les résultats concernant les cinq plus hauts sommets des Pyrénées :

- Néthou 3 482 m, au lieu de 3 404 m, écart + 78 m ;
- Posets 3 437 m, au lieu de 3 367 m, écart + 70 m ;

- Mont Perdu 3 404 m, au lieu de 3 355 m, écart + 49 m ;
- Cylindre 3 369 m, au lieu de 3 328 m, écart + 41 m ;
- Vignemale 3 353 m, au lieu de 3 298 m, écart + 55 m.

On observe des écarts encore plus élevés sur :

- Le Pic des Crabioules occidental 3 215 m, au lieu de 3 116 m, écart + 99 m ;
- Pic de Rious ou Montarto d'Aran 2 940 m, au lieu de 2 826 m, écart + 114 m ;
- Montcalm 3 250 m, au lieu de 3 078 m, écart + 172 m.

Ces écarts systématiquement positifs proviennent essentiellement de l'instrument composite niveau-éclimètre utilisé, mesurant les angles verticaux avec une erreur systématique et avec une précision nettement insuffisante et accessoirement du manque de précautions prises pour s'affranchir de l'effet de la réfraction atmosphérique sur des visées souvent trop longues. Reboul a eu la chance de classer correctement en tête le Pic oriental de la Maladetta qu'il baptise *Néthou* (avec un h), francisation d'Aneto, nom du village espagnol le plus proche. Pour l'altitude de celui-ci il prend la moyenne entre une détermination de 1766 toises et une autre de 1 809 toises, soit 43 toises d'écart ou 84 m. D'autres moyennes sont calculées dans des conditions comparables. Les contemporains de Reboul, dont Ramond, pouvaient ainsi, d'après la publication de 1817, avoir une idée de la mauvaise qualité des résultats de Reboul.

6. Les déterminations d'altitudes de Ramond

Ramond fréquenta les Pyrénées à partir de 1787, où il se trouvait à Barèges avec le *cardinal de Rohan*. En montant au Pic du Midi il rencontre cette année là, au lac d'Oncet, Vidal et Reboul effectuant le nivellement au niveau du Pic. Ramond se souviendra longtemps de cette rencontre.

De 1787 à 1798 il parcourt les Pyrénées et procède à des déterminations

diverses d'altitudes. En 1802 il fait l'ascension du Mont Perdu et en détermine l'altitude au baromètre : 3 364 m au lieu de 3 355 m, avec une erreur de seulement 9 m, ce qui est assez remarquable. En 1805 il lit à l'Académie des Sciences son "mémoire barométrique", où il fait état de sa "détermination plus exacte du coefficient de M. de Laplace" (voir 2.2).

En 1815 il fait à l'Institut la lecture d'un mémoire intitulé "Application des nivellements exécutés dans le Puy de Dôme (7) à la géographie physique". Dans une série d'altitudes d'Auvergne il intercale pour comparaisons plusieurs altitudes qu'il a déterminées dans les Pyrénées. Il meurt le 27 mai 1827 ; dans une des dernières notes qu'il a écrites avant sa mort, il se remémore la rencontre qu'il a eue en 1787, donc 40 ans auparavant, au lac d'Oncet, avec Reboul et il s'exprime ainsi à son sujet : "*Il avait un baromètre dont il se servait fort mal, tandis qu'un apothicaire de Barèges lui faisait les observations correspondantes sans rien y comprendre*" (8).

7. Les déterminations barométriques de Parrot en 1817

Le docteur Parrot de Carlsruhe, né en 1791 est d'origine allemande et de nationalité russe. A 20 ans il s'est fixé comme tâche de mesurer barométriquement la limite des neiges éternelles dans le Caucase, les Alpes, les Pyrénées. Outre son projet de déterminer les limites des neiges éternelles des Pyrénées, il se propose d'en étudier la végétation et il veut savoir s'il y a une différence de niveau entre l'Océan Atlantique et la Méditerranée. Le 4 septembre 1817 il se rend à St Jean-de-Luz, le 5 septembre il y lit le baromètre au niveau moyen de l'Atlantique. Il parcourt à pied toute la chaîne pyrénéenne ; il passe par les cols en barométrant toutes les deux heures de sept heures du matin à six heures du soir. La première observation du matin est faite au dernier point déterminé la veille. Ses rapports sont en allemand ; il donne ses altitudes en mètres avec deux décimales, ce qui est évidemment excessif et illusoire.

Contentons nous d'évoquer son ascen-

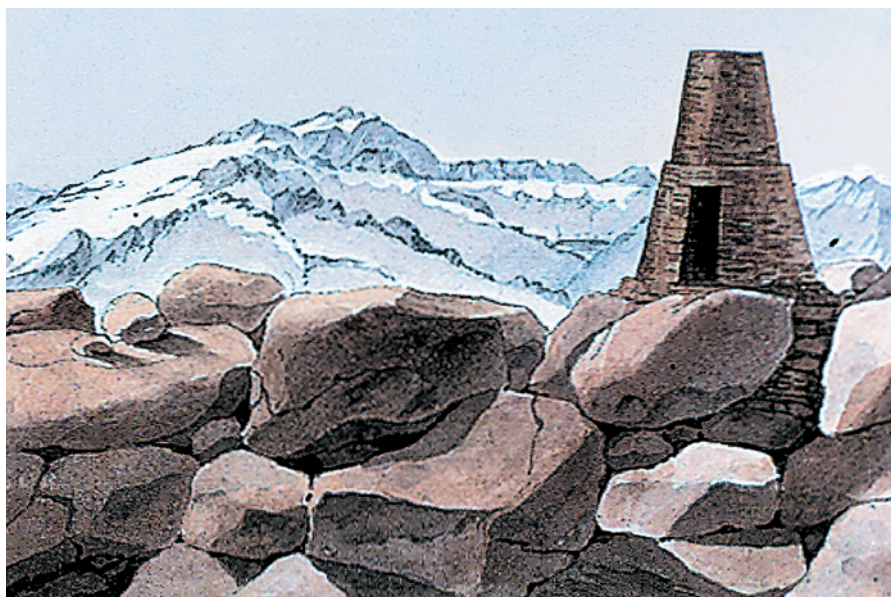
■ ■ ■ sion à la Maladetta avec le guide Pierre Barrau. Après être passé à l'Hospice de France et au Port de Venasque, il bivouaque au lac de Paderne le 29 septembre au soir. Le lendemain il part à cinq heures du matin, détermine l'altitude du glacier de la Maladetta. Il fait l'ascension du "vrai sommet de la Maladetta" ; avec 3 m de rocher terminal, l'altitude est 3 310 m. A propos du Néthou, il s'exprime ainsi : "Il doit avoir 60 m de plus que le Pic de la Maladetta et 20 m de plus que le Mont Perdu" (en réalité, le Néthou dépasse le Mont Perdu de 49 m). Le retour s'effectue rapidement par le port de la Picade, le pas de l'Escalette, l'Hospice de France jusqu'à Luchon, d'où la nouvelle sensationnelle est immédiatement envoyée à Toulouse : "la Maladetta est gravis" (9).

Parrot n'avait pas le souci exclusif de déterminer des altitudes de sommets ; il détermine aussi des altitudes de cols, de bases de glaciers, de lacs, etc. Il termine son itinéraire le 27 octobre au Canet ; il y fait une observation barométrique au niveau de la Méditerranée et trouve que le niveau de celle-ci est inférieur de 4,10 m à celui de l'Océan Atlantique. On admet actuellement que le niveau de la Méditerranée est inférieur de 0,30 m à celui de l'Atlantique. Dans l'ensemble les résultats de Parrot sont très médiocres, voire mauvais. On note des écarts dépassant parfois 40 m par rapport aux altitudes modernes.

8. Autres déterminations d'altitudes au début du XIX^e siècle

En 1803 le géologue *Louis Cordier* publie dans le Journal des Mines de Messidor an XII un "Rapport fait au Conseil des Mines sur un voyage à la Maladetta par la vallée de Bagnères de Luchon dans les Pyrénées – 17 Vendémiaire an XI", soit 23 septembre 1802. Il y est indiqué que la Maladetta aurait 47 m de moins que le Mont Perdu.

En 1813 *Dralet*, conservateur des Eaux et Forêts à Toulouse donne dans sa "Description des Pyrénées" en deux volumes, publiés à Paris, neuf altitudes des sommets les plus remarquables des Pyrénées, empruntées à Reboul,



© Menet/IGN, DR

Signal du Pic de Maupas, aquarelle par Peytier et Hossard. Reconnaissance 1825, observations 1826.

mais ne concordant pas avec les altitudes que celui-ci publiera en 1817.

9. La triangulation des Pyrénées par les ingénieurs géographes (1825 à 1827)

■ 9.1. La description de la Chaîne des Pyrénées par Corabœuf.

Tel est le titre du rapport officiel qui occupe 70 pages dans le Mémorial du Dépôt général de la Guerre, Tome VI, édité en 1832 sous la direction de *L. Puissant*. La base géodésique de départ est celle qui avait été mesurée par *Delambre* au voisinage de Perpignan sur la méridienne de France, qui a servi à l'établissement du système métrique. La chaîne a pour côté de vérification la longueur d'une base mesurée en 1827 dans les environs de Dax ; c'est la base de Gourbera sur la chaîne de raccordement entre la chaîne des Pyrénées et la chaîne parallèle de Rodez (voir haut de la fig. 6). La partie Est de la chaîne des Pyrénées, du Crabère à la Méditerranée a été reconnue et observée par l'ingénieur Géographe *Corabœuf*, qui avait la responsabilité des travaux de toute la chaîne et pour adjoint l'ingénieur géographe *Testu*. Dans un premier projet Corabœuf avait prévu de stationner le Pic de Rious ou Montarto d'Aran, ce qui aurait donné une chaîne assez rectiligne (voir fig. 7).

Par suite de l'interdiction des autorités espagnoles de stationner le Montarto, Corabœuf a dû effectuer une sorte de déviation de la chaîne vers le Nord, pour y inclure le point géodésique "Gardan de Montagu" baptisé par la suite "Tour d'Ausseing". La partie occidentale de la chaîne entre l'Océan et le Crabère (fig. 6) a été reconnue et observée par les ingénieurs géographes *Peytier* et *Hossard*. La reconnaissance, comportant le choix des stations et la construction des signaux, a été effectuée en 1825 tout le long de la chaîne. Chaque station de haute montagne était marquée par une pierre maçonnée à la chaux et au sable au niveau de sol, avec une croix gravée et le millésime. Dans les stations moins élevées était mise en place une borne (voir fig. 3). Les signaux de haute montagne étaient constitués d'un cône tronqué circulaire construit en pierres sèches.

Les instruments de mesure des angles horizontaux et verticaux étaient deux cercles répéteurs de Gambey du même principe que le cercle répéteur de Borda. La base de Gourbera a été mesurée avec les mêmes règles de platine de 2 toises (3,90 m) qui avaient été utilisées par *Delambre* sur la base de Perpignan. On conçoit la lourdeur des opérations consistant à mettre bout à bout avec précision des règles d'un peu moins de 4 m de long sur une distance

Figure 6

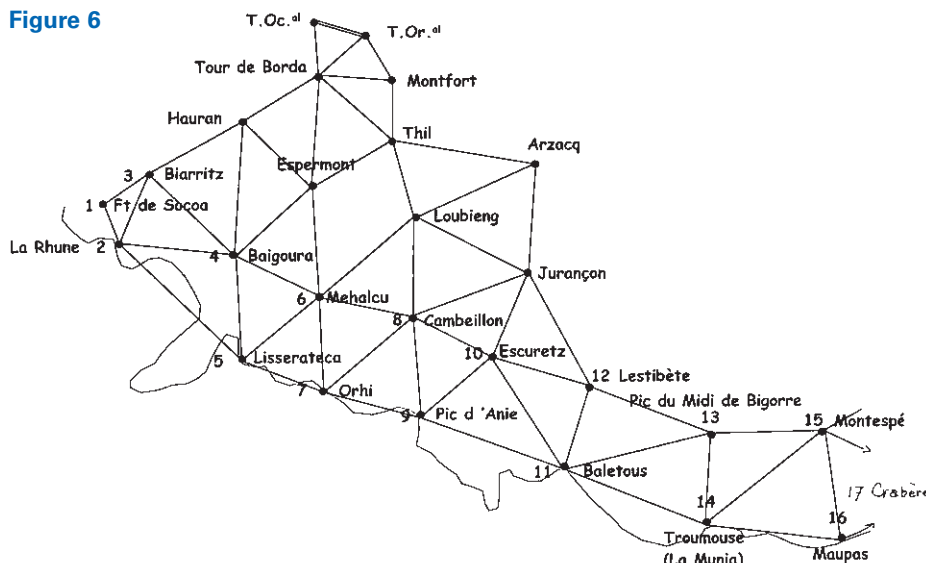
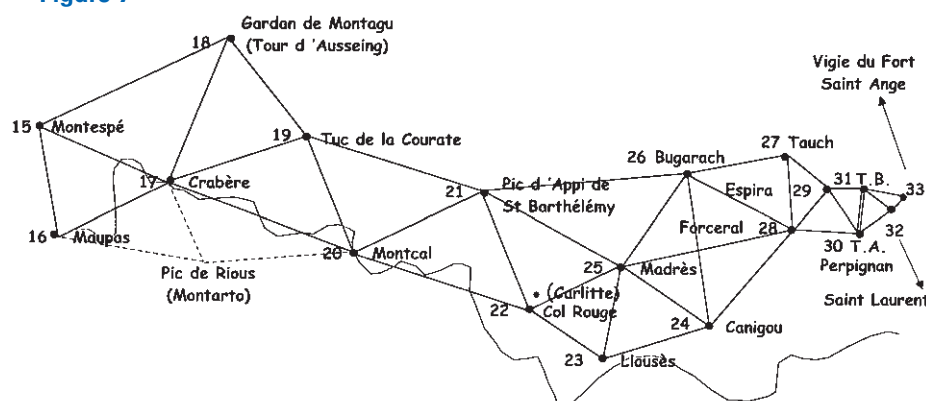


Figure 7



| N° | Sommet | Altitude | N° | Sommet | Altitude | N° | Sommet | Altitude |
|----|---------------|----------|----|-------------------|--------------------|----|--------------------|----------|
| 1 | Fort de Socoa | 8,43 | 12 | Lestibète | 1850,94 | 23 | Lioussès | 2831,61 |
| 2 | La Rhune | 900,14 | 13 | Pic du Midi | 2876,74 | 24 | Canigou | 2785,23 |
| 3 | Biarritz | 68,96 | 14 | Troumouse | 3086,25 | 25 | Madres | 2470,83 |
| 4 | Baigoura | 897,14 | 15 | Montaspet | 1848,56 | 26 | Bugarach | 1230,64 |
| 5 | Lisseratica | 1408,58 | 16 | Maupas | 3110,15 | 27 | Tauch | 879,15 |
| 6 | Mehalcu | 648,38 | 17 | Crabère | 2628,85 2630,52 | 28 | Forcerai | 507,46 |
| 7 | Pic d'Ohri | 2016,63 | 18 | G. de Montagu | 628,34 | 29 | Espira | 455,17 |
| 8 | Cambeillon | 659,96 | 19 | Tuc de La Courate | 1422,40 | 30 | T.S.Base | 31,14 |
| 9 | Pic d'Anie | 2504,25 | 20 | Montcalm | 3079,51 | 31 | T.N. Base | 12,65 |
| 10 | Escuretz | 1440,63 | 21 | St Barthélémy | 2348,83 | 32 | St Laurent de S | 30,11 |
| 11 | Balaïtous | 3145,85 | 22 | Col Rouge | 2805,81 | 33 | Vigie Fort St Ange | 5,33 |

Tableau 8

d'environ 12 km. Les opérations de mesure ont duré 3,5 mois, d'Avril à juillet 1827. La mesure déduite de l'enchaînement à partir de la base de Perpignan est : $B_e = 12\,220,769$ m. La mesure directe est $B = 12\,220,031$ m. L'accord des bases se fait donc avec une erreur $B_e - B = 0,738$ m sur un tra-

jet d'environ 500 km. Dans la partie occidentale de la chaîne le nivellement des Pyrénées ne concerne qu'une partie des triangles.

Sont numérotés de 1 à 16 sur la figure 6 les sommets qui concernent l'enchaînement des altitudes depuis l'Océan jusqu'au point 17, le Crabère

l'Océan jusqu'au point 17, le Crabère (voir tableau 8). La fig. 7 représente la partie Est de la chaîne où les sommets nivelés ont les numéros 17 (le Crabère) à 33, près de la Méditerranée (voir le tableau 8 où les flèches indiquent le sens du calcul). On met ainsi en évidence pour le point 17, le Crabère, l'une sous l'autre, deux altitudes différant de 1,67 m. Mais l'enchaînement des altitudes peut s'effectuer de quatre autres manières, dont la moyenne des différences est selon Corabœuf de 0,73 m. Se référant à des calculs de probabilités de Puissant, Corabœuf conclut : "cette moyenne 0,73 m ne sortant pas de la limite des erreurs probables nous devons en conclure que les deux mers ont le même niveau ou du moins que leur inégalité, si elle existe, doit être très peu sensible" (10). Remarque : Sur les figures 6 et 7 nous avons respecté les graphies des noms de stations utilisées par Corabœuf dans ses schémas de triangulation. Dans le tableau 8 nous avons rétabli les graphies actuelles.

Triangulation de 2^e ordre.

Alors que la longueur moyenne des côtés de la triangulation de 1^{er} ordre étudiée ci-dessus est de l'ordre de 30 km, les longueurs des côtés de la triangulation de 2^e ordre varient entre 10 et 15 km. Les points géodésiques de 2^e ordre sont en général obtenus par le procédé de l'*intersection* en visant le sol des sommets à partir des points de 1^{er} ordre. Corabœuf donne ainsi les altitudes de 122 points de triangulation de 2^e ordre, parmi lesquels figurent les géants des Pyrénées, de plus de 3 000 m : le Vignemale, le Cylindre, le Mont Perdu, le Cambielle, le Neouvielle, le Posets, le Perdighero, le Quairat, le Néthou...

Toutes les altitudes, aussi bien celles des points de 1^{er} ordre que celles des points de 2^e ordre, coïncident au mètre près avec les altitudes modernes ; ce sont les premières altitudes précises des sommets des Pyrénées. Par la suite : l'achèvement de la triangulation de 2^e ordre, la triangulation de 3^e ordre, les travaux topographiques de la carte d'Etat-major fourniront les premières altitudes précises des sommets moins importants des Pyrénées.

■ 9.2. "L'odyssée" (11)

des ingénieurs géographes dans les Pyrénées.

Béraldi a pu avoir accès aux "Archives de la Guerre" et aux archives du "Service géographique de l'Armée" qui a succédé en 1888 au "Dépôt général de la Guerre", maître d'œuvre de la triangulation de la France et des premières éditions de la carte d'Etat major au 1 : 80 000, dont la triangulation des ingénieurs géographes constitue la charpente. Il a pu consulter un certain nombre de documents parmi lesquels figurent les dessins des signaux et les "tours d'horizon" observés aux sommets de 1^{er} ordre. Des reproductions de certains de ces documents figurent dans l'ouvrage "Balaïtous et Pelvoux". Il a pu aussi lire des récits relatant les péripéties qui ont marqué la reconnaissance et les observations des ingénieurs géographes. C'est ainsi qu'en Août 1826 les conditions météorologiques sont épouvantables au Balaïtous. Peytier et Hossard y sont bloqués par la neige ; manquant de vivres ils envoient des hommes au ravitaillement, mais par suite d'une tempête de neige ces hommes ne pourront pas accéder au sommet. La mort dans l'âme Peytier et Hossard sont obligés de quitter le signal laissant sur place le cercle répéteur. Avec le froid qui sévissait, sans vivres, sans possibilité de se chauffer, c'eût été la mort assurée s'ils étaient restés au sommet. Ils remonteront plus tard terminer leurs observa-



Temple de Philae, Assouan, Egypte. Inscription commémorant le point le plus au Sud atteint par l'expédition (1799). On y lit le nom de Corabœuf, ingénieur géographe qui devait opérer dans les Pyrénées.



© Menet/IGN, DR

Signal du Pic du Crabère, aquarelle par Corabœuf et Testu.

tions. Corabœuf et Testu ont rencontré des difficultés du même ordre au Montcalm. On ne peut qu'admirer le courage, le sens du devoir et les efforts physiques déployés par les quatre ingénieurs en trois étés, durant lesquels ils ont effectué des observations précises et obtenu des résultats remarquables. L'altitude qu'ils ont donnée pour le Néthou (Pic d'Aneto) : 3 404 m figura longtemps sur les cartes et atlas. Grand a été, à partir de 1860 l'étonnement des pyrénéistes, parmi lesquels on compte des Anglais, de constater que le sommet qu'ils venaient de gravir présentait des vestiges laissés 35 ou 40 ans plus tôt par les ingénieurs géographes (12) ; ces pionniers du pyrénéisme étaient convaincus avant leur ascension que celle-ci constituait une "première", ce qui n'était pas le cas.

Il convient d'évoquer la formation qu'ont reçue les ingénieurs géographes des Pyrénées. Ils ont tous effectué leurs études à l'Ecole Polytechnique, nouvellement créée en 1794 par Monge, qui resta plusieurs années président du Conseil de perfectionnement de l'Ecole. Durant cette période, outre un enseignement scientifique de qualité, l'Ecole dispensait l'enseignement et la pratique de plusieurs techniques telles que la topographie, la cartographie, l'art des fortifications, des constructions publiques, d'architecture ; c'était bien une école polytechnique, caractère qu'elle a perdu en partie lorsque Laplace devint président du Conseil de perfectionnement et encore de nos jours. Après deux ans

d'études à l'Ecole Polytechnique les ingénieurs géographes recevaient leur spécialisation à l'Ecole des ingénieurs géographes. On peut expliquer ainsi pourquoi Corabœuf, qui avait été affecté en 1798 à l'Armée d'Orient et faisait partie de la campagne d'Egypte, détermina à 21 ans la longitude et la latitude d'Alexandrie, triangula le delta du Nil et mesura la hauteur des Pyramides.

9.3. Commémorations diverses des travaux de triangulation des ingénieurs géographes

- Sur la façade des thermes Chambert, à Luchon à droite de l'entrée, a été apposée en 1925 une plaque commémorant le centenaire de la reconnaissance du Maupas par Peytier et Hossard.
- Sur la route d'Argelès à Arras-en-Lavedan, près d'Argelès-Gazost, a été érigé, aussi en 1925, un monument ressuscitant à ses dimensions exactes, mais en maçonnerie, la tourelle en pierres sèches du Balaïtous construite en 1825 par Peytier et Hossard (13).
- Sur un assez récent refuge à 2 060 m, au plan de l'Aribet, fut apposée en 1962 une plaque, tout près de l'ancienne cabane, où Peytier et Hossard campèrent plusieurs fois avant de faire leurs ascensions au Balaïtous.
- Enfin le Musée Pyrénéen du Château fort de Lourdes possède divers documents concernant Peytier et Hossard et même les piquets de la tente dressée en 1826 par les deux ingénieurs. ●

Raymond D'HOLLANDER

Ancien directeur de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques.
Ingénieur général géographe honoraire.

Bibliographie

1. **BERALDI (Henri)**, Cent ans aux Pyrénées, 1898.
2. **BERALDI (Henri)**, Balaitous et Pelvoux, 1907-1910.
3. **BERALDI (Henri)**, Le sommet des Pyrénées, 1923.
4. **BARRERE (Maurice)**, "Une station géodésique en 1826 dans les Pyrénées, les ingénieurs géographes Peytier et Hossard" in "Actes du Congrès national des Sociétés savantes", Paris 1959 (géographie).
5. **BLANCHET (Jacques)**, "Le Pic d'Aule de

- Reboul" in n°38 de Pyrénées, p. 133 à 136.
6. **BAUDRIMONT (Henri)**, Carte des stations de Junker (autour du Vignemale) en 1792. Cette carte illustre l'article ci-après.
 7. **MAURY (Luc)**, "Ascensions au Vignemale (Junker 1792)" in n° 90 de Pyrénées, p. 131 à 139.
 8. Trois siècles de cartographie dans les Pyrénées, catalogue de l'exposition du Musée Pyrénéen au Château fort de Lourdes (Juin à Octobre 1978).
 9. **VINET (Emile)**, "Le Pic du Midi : Relever le signal géodésique" in n° 202 de Pyrénées, 2000, p. 147 à 156.
 10. **RODES (Michel)**, "Les Officiers géodésiens aux Pyrénées 1825-1827 et 1848-1851" in n° 2 de Vues d'en haut les Pyrénées, Les Feuilles du Pin à Crochet, Pau, 2001.
- (1) L'altitude déterminée en 1827 par les ingénieurs

géographes Peytier et Hossard et matérialisée alors par une borne, maintenant disparue, était de 2 876,74 m.

(2) Astronomes et géodésiens ont toujours eu le souci d'accroître la précision des mesures d'angles par des améliorations apportées à la construction des instruments, mais aussi par les méthodes d'observation, telles que la répétition et la réitération, de sorte qu'on atteint actuellement une précision de l'ordre du décimilligon = $1/10^4 \times \pi/200 = 1/636\,620$; c'est l'angle sous lequel on voit 1cm à 6 365 m. Le gon est la nouvelle appellation du grade.

(3) Vidal, astronome, a eu un observatoire personnel à Mirepoix et il a été directeur de l'Observatoire de Toulouse.

(4) Reboul était simple étudiant en 1787 ; en 1817 il est membre correspondant de l'Académie des Sciences.

(5) Allusion à la Maladetta qui en fait se trouve en Aragon.

(6) Altitude du Pic du Midi avant construction de bâtiment ORTF, voir note 1.

(7) En 1806 il avait été nommé préfet du département du Puy-de-Dôme.

(8) Il s'agissait de respecter la simultanéité des observations de Reboul sur les pentes du Pic du Midi avec celles faites à Barèges, pour obtenir des dénivelées correctes des stations de Reboul par rapport à Barèges.

((9)Le Nêthou (pic d'Aneto) sera gravi pour la première fois en 1842 par le Russe Platon de Tchihatchef.

10) rappelons que l'on admet actuellement que la Méditerranée est plus basse de 0,30 m par rapport à l'Océan Atlantique.

(11) Mot qu'utilise Beraldi dans Balaitous et Pelvoux pour décrire les exploits des ingénieurs géographes des Pyrénées.

(12) Les ingénieurs géographes campaient sous la tente lors de leurs observations, près du sommet, selon les directives de Corabœuf.

(13) Voir l'article d'Emile Vinet (Bibliographie 9). La page 133 de cet article contient deux photographies du monument d'Argelès-Gazost aux ingénieurs géographes du parallèle des Pyrénées.

Remerciements

La rédaction de XYZ est heureuse de remercier M. Michel Clin, professeur émérite de géologie (université de Bordeaux III), directeur général de la publication de la Revue "Pyrénées", président de l'Association des Amis du "Musée pyrénéen de Lourdes", d'avoir donné son autorisation à la publication dans XYZ de l'article sur "Les premières déterminations d'altitudes des sommets des Pyrénées", article qu'il a bien voulu présenter lui-même aux lecteurs de XYZ.

L'article présenté ici sous la signature de R. D'Hollander a paru dans une livraison trimestrielle de la revue érudite "Pyrénées", consacrée aux études dont le Musée Pyrénéen du Château-Fort de Lourdes est le centre, et vouée à l'illustration d'un patrimoine culturel régional. Cette revue, marquant son intérêt pour les questions de mémoire en matière de géodésie et de topographie, a souvent traité de la patiente exploration de la chaîne pyrénéenne, des efforts déployés il y a deux siècles pour en fixer la géographie, et finalement, les bases de la cartographie. Le souci des premiers explorateurs fut la détermination des altitudes et la recherche du sommet dominant, avec rédaction de récits descriptifs. R. D'Hollander a offert à la revue "Pyrénées" ce qui lui manquait : la révision critique des démarches opératoires successives et de leur perfectionnement, jusqu'à la triangulation de première ordre, ou "Grande Triangulation", qui fixa en cette occasion de nombreuses altitudes correctes (1825-1827). Le numéro 215 de "Pyrénées" paru en septembre 2003 comporte, outre cet article fondamental, d'une part l'évocation d'une première figuration de la position et de l'altitude des sommets, produite en 1848 par Emilien Frossard en forme de diorama et dont un exemplaire est au Musée Pyrénéen, d'autre part sous la plume de l'érudite Alain Boumeton l'histoire de deux scientifiques associés, Henri Reboul et Jean Vidal, qui, bien que n'ayant sans doute pas vraiment atteint la performance, ont laissé pour souvenir à la fin du dix-huitième siècle et au début du dix-neuvième, celui d'un grand explorateur et celui d'un brillant opérateur des plus hauts sommets pyrénéens.

Michel Clin

Mesure et proportion dans la loge de la Signoria à Florence

■ Giampiero MELE

Le problème de la mesure "La plante de mon pied sert de mesure pour le ciel et la terre" gravure sur le Compas du Christ du Saint-Sépulcre à Jérusalem (XI^e siècle)

Historiquement l'homme a d'abord appris à compter puis à écrire. La première technique de calcul connue utilise comme instrument les doigts de la main. Cette technique a permis l'élaboration des théories qui expliquent la nature grâce aux nombres. Quasi simultanément à la nécessité d'ordonner les choses à travers les nombres est née la nécessité d'appréhender l'espace à travers la mesure. A l'instar de la numération, les instruments de mesure tirent leur origine du corps humain. En conséquence si le système numérique a été trouvé en accord avec les membres humains et si on relève une correspondance proportionnelle (dérivée de l'unité de base déterminée) entre les parties distinctes du corps et son aspect entier, on comprend alors pourquoi les unités métriques utilisées par les constructeurs anciens s'identifient avec des noms comme doigt, empan, pied, cubitus, bras. En observant la structure des unités de mesure anciennes on remarque que leur subdivision se fait selon un chiffre que les Grecs appelaient téleον¹ (parfait).

Le numéro "parfait" n'avait pas été décidé de manière univoque, mais il en existait trois considérés "parfaits" pour différentes raisons : le dix, le six ($2 \times 3 = 6$ en grec diplàson qui veut dire double) et le seize (dit parfait en tant que somme de

$6 + 10$). Cela explique pourquoi la plus grande partie des unités métriques anciennes sont multiples de dix, douze ou seize sous-unités et réciproquement leur subdivision se fait selon des chiffres qui sont divisibles par dix et/ou par douze. Une telle subdivision augmente la possibilité de comparaison et de confrontation entre les unités différentes en facilitant les calculs.

Le problème de la commensurabilité est rapporté à celui de la création du monde. La mesure est donc l'instrument de la création architecturale qui engendre à travers la proportion et sur la base d'une unité anthropomorphique, simultanément aux nombres et à la géométrie, un langage articulé avec des règles compositrices et structurales.

L'outil qui a contribué au succès de l'architecture florentine du moyen âge est le Bras Florentin de panno (58,36 cm) (fig. 1). Sa structure organisée tient compte de la base de dix autant que de la base de douze. Elle produit deux types de multiples qui seront protagonistes en deux périodes historiques différentes : la canne commerciale (la canna mercantile) (4 bras = 2,334 m) qui a été employée durant la période médiévale et la canne agrimensoria (5 bras = 2,918 m) utilisée pendant la Renaissance.

La canne commerciale ou canne ferrée² décrites dans le XXXVIII des Statuts de l'art des Marchands de Calimala, est divisée en tiers et en quarts. Filarete dans son traité indique comme sous-multiples du bras la moitié, les tiers, les quarts, les sixièmes, les huitièmes et les douzièmes. Un autre type de division canonique divise par contre le bras en 20 soldi et 240 denari (20 soldi \times 12 denari = 240 denari).

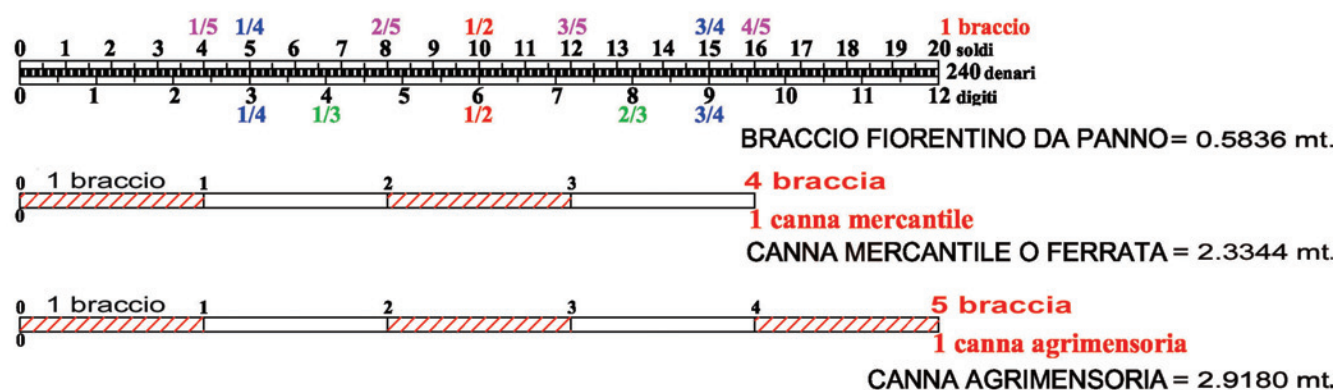


fig. 1- Système métrique utilisé à Florence : Bras florentin de panno et les deux premiers multiples, la canne mercantile et la canne agrimensoria

La loge de la Signoria scène de la vie politique florentine

De la deuxième moitié du XIII^e à la première moitié du XIV^e siècle la construction des nouveaux remparts, voulue par la République florentine, dessine les nouvelles limites urbaines de la ville. À l'intérieur de celles-ci prennent forme les émergences urbaines qui deviendront symboles de reconnaissance et d'identification de la ville (fig. 2). Parmi les constructions les plus importantes de l'époque on peut citer, sans aucun doute, le Palazzo dei Priori ou Vecchio, et sa loge. Au début de sa construction Palazzo Vecchio (1298-1313 projets d'Arnolfo di Cambio) donne sur une place (vieille place des Uberti) trop petite pour les rassemblements et les réunions publiques. À partir de 1299 on agrandit cette place vers l'ouest. Cette opération doit permettre au Palais d'Arnolfo de dominer un espace plus dégagé et ainsi pouvoir être admiré plus facilement en ménageant une vue libre du côté du fleuve où s'élèvera plus tard la Loggia des Priori. Elle constituait avec le Palais le nouveau fond de décor de l'espace urbain, cœur de la vie civique et politique de Florence (fig. 3, 4).

L'idée de construire une loge politique découle probablement du projet d'agrandissement de la place de la Signoria. En 1356, un premier projet de loge est approuvé par le Conseil Major de la Signoria mais pour différentes raisons il ne sera jamais réalisé sous cette forme. En 1374, la Signoria décide l'édification d'une loge communale plus importante que la première et s'adresse à l'Oeuvre du Duomo pour en financer la réalisation et fournir les meilleurs ouvriers déjà employés lors de la construction de la Cathédrale florentine. Les maîtres d'œuvre affectés furent successivement Simone di Francesco Talenti, Taddeo Ristori, Benci di Cione Dami et Lorenzo di Filippo³. Ils avaient déjà travaillé à la construction de la Cathédrale, Benci di Cione Dami s'occupant particulièrement de la construction de la voûte. Simone Talenti se consacra à la décoration sculptée et aux pilastres de la Cathédrale. Ensemble ils participèrent au chantier de la Loggia di Orsammichele⁴, toujours à Florence.

La Loge des Priori représente l'un des premiers exemples de loge politique. Elle est composée de trois travées (fig. 4) appuyées sur des piliers cruciformes, couvertes par des croisées de voûtes en berceau surélevées de grandes dimensions (la portée coté place est de 10,50 m et coté de la rue Vacchereccia de 11,67 m.). Les caractéristiques de ce bâtiment sont remarquables. On peut citer sa dimension (la façade qui donne sur la place a une longueur de 37,30 m environ, et une hauteur de 23,35 m), sa position (exactement alignée avec le coté nord du Palais selon une direction importante par rapport au dessin des remparts fig. 4), sa symétrie (l'accès à l'intérieur se fait par l'arcade centrale et ceci lui donne la monumentalité nécessaire aux célébrations de la vie politique fig. 3) et enfin la qualité des voûtes croisées. Ces dernières, très particulières pour leur époque, ont la caractéristique d'avoir les génératrices majeures des ongles égales à une partie de l'arc diagonal (fig. 6, 7, 8). Le résultat de ce choix confère à ce type de voûte une hauteur plus importante que les voûtes normales



fig. 2 - Portion d'une part de la carte de Florence dite "de la Catena", 1471-1482. Berlin, Kupferstichkabinett. En rouge est mis en évidence la Loggia della Signoria.



fig. 3 - G. Vasari, G. Stradano : Venue de Leon X à Florence, Palazzo vecchio salle de Leon X.

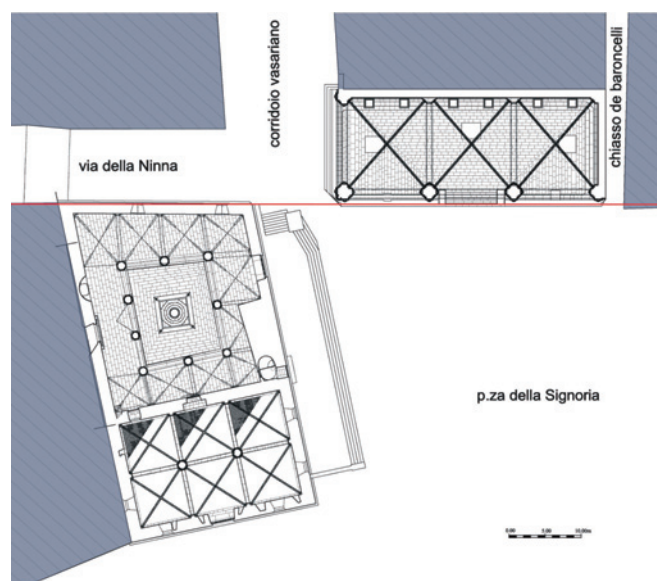


fig. 4 - Particulier de la planimétrie de Piazza de la Signoria qui met en relation le plan du Palazzo avec celle-ci de la Loggia.



fig. 5 - Loggia de la Signoria ou des Priors vue de rue de la Ninna

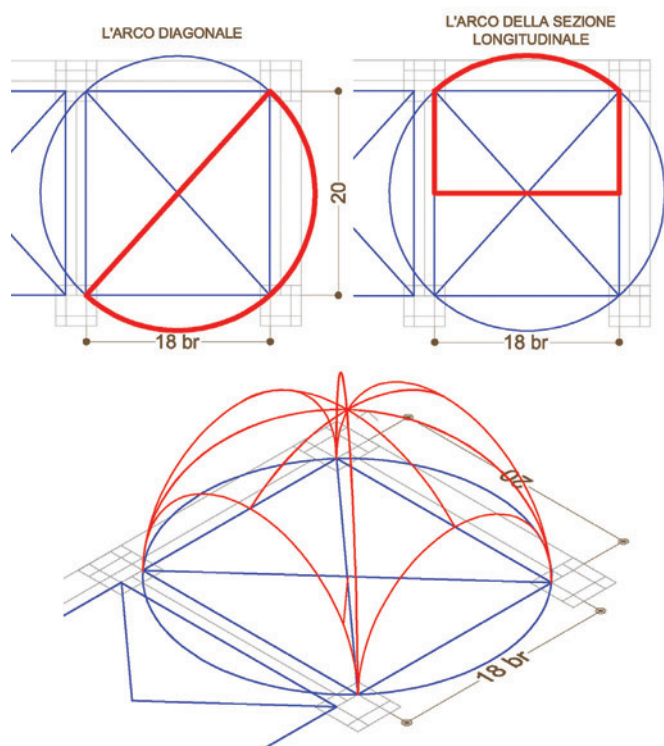


fig. 6,7,8 - Détermination des arcs diagonale set des génératrices des ongles des voûtes de la Loggia de la Signoria ou des Priors.

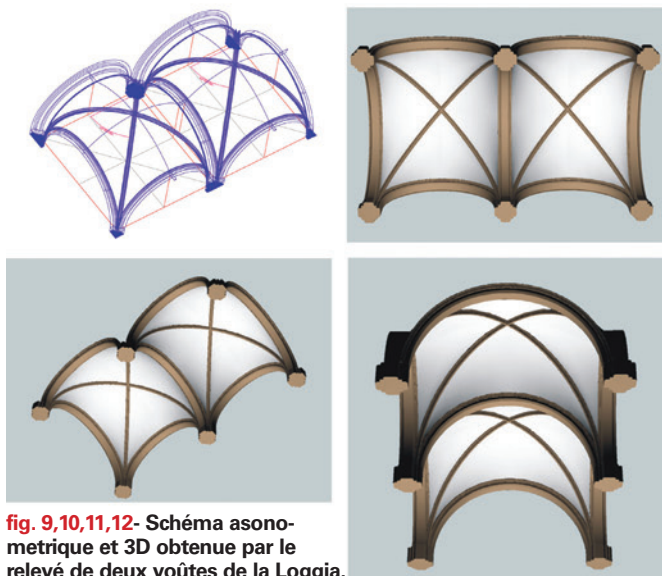


fig. 9,10,11,12- Schéma asonométrique et 3D obtenue par le relevé de deux voûtes de la Loggia.

des berceaux croisés (fig. 9, 10, 11, 12) et génère une surface bombée similaire à une coupole en pendentifs (couvrement qui se diffuse à Florence pendant la Renaissance). Pour cette raison la Loge des Priors représente, dans la gamme des voûtes croisées en briques, un exemple d'audace architecturale que l'on peut comparer seulement aux voûtes de Santa Maria Novella et de Santa Maria del Fiore de Florence. Une bonne hypothèse est celle qui voit en Benci di Cione Dami le maître d'œuvre qui a donné son élan majeur au projet de la Loge des Priors. Il ne faut pas oublier que Benci a été formé sur le chantier de Santa Maria Novella⁵ et avait déjà démontré, en différentes occasions, une certaine familiarité avec la construction des voûtes.

Les caractéristiques mises en évidence confèrent à la Loge des Priors une image de prestige adaptée à sa fonction de représentation. Elles font d'elle un modèle d'inspiration pour les projeteurs de loges qui devront, pendant la Renaissance, illustrer la grandeur des familles nobles (par exemple la Loge Rucellai).

Un méthode de construction : l'échelle métrique

Marchionne di Coppo Stefani, Cronica, Firenze XIV sec. :...*Nel mese di novembre 1382 la loggia di sulla piazza de Priors venne tutta compiuta ed intonicata d'ogni maestro e d'ogni arme, intagliate, poste di fuori, salvocchè di figure, che a porre v'erano ; la quale loggia fu di grandezza, il vano dentro lunga braccia 60 e di larghezza braccia 23 e d'altezza braccia 28....*

Le relevé scientifique de certains monuments moyenâgeux de l'aire florentine et l'observation de leur forme ont permis la redécouverte de certaines caractéristiques géométriques et mathématiques communes. Elles permettent de confronter entre elles ces architectures et de mettre en évidence une similitude de langage et donc de projet qui va du général ou particulier, du grand au petit. Le relevé de la Loge des Priors effectué après celui de la Loge de Orsammichele, a permis, grâce à l'analyse métrique, de formuler une hypothèse en ce qui concerne la méthode de construction. Cette façon d'opérer permet de définir un modèle à travers une série de dessins selon certaines échelles de représentation (agrandissements et réductions) qui partant du général arrivent à la description détaillée du particulier. Le projet, en plan et en élévation, est construit sur une série de grilles qui aux différentes échelles aident le concepteur à redistribuer les quantités au moment de la définition des détails de projet. Grâce à cette méthode la solution finale reste fortement liée au schéma général de départ. En peu de mots on avance ici l'hypothèse de l'existence des schémas de plan (icnographia) et d'élévation (orthographia) qui furent obtenus à travers des raisonnements arithmétiques-géométriques combinés (selon Vitruve) avec Inventio⁶. Cette répartition permet, aux différentes échelles, de conserver formes et quantités métriques à travers les dessins. Cette démarche sûrement expérimentée est utilisée aussi dans la construction des grandes cathédrales. Elles permettent aux maîtres d'ouvrage ou aux organes de contrôle de l'œuvre

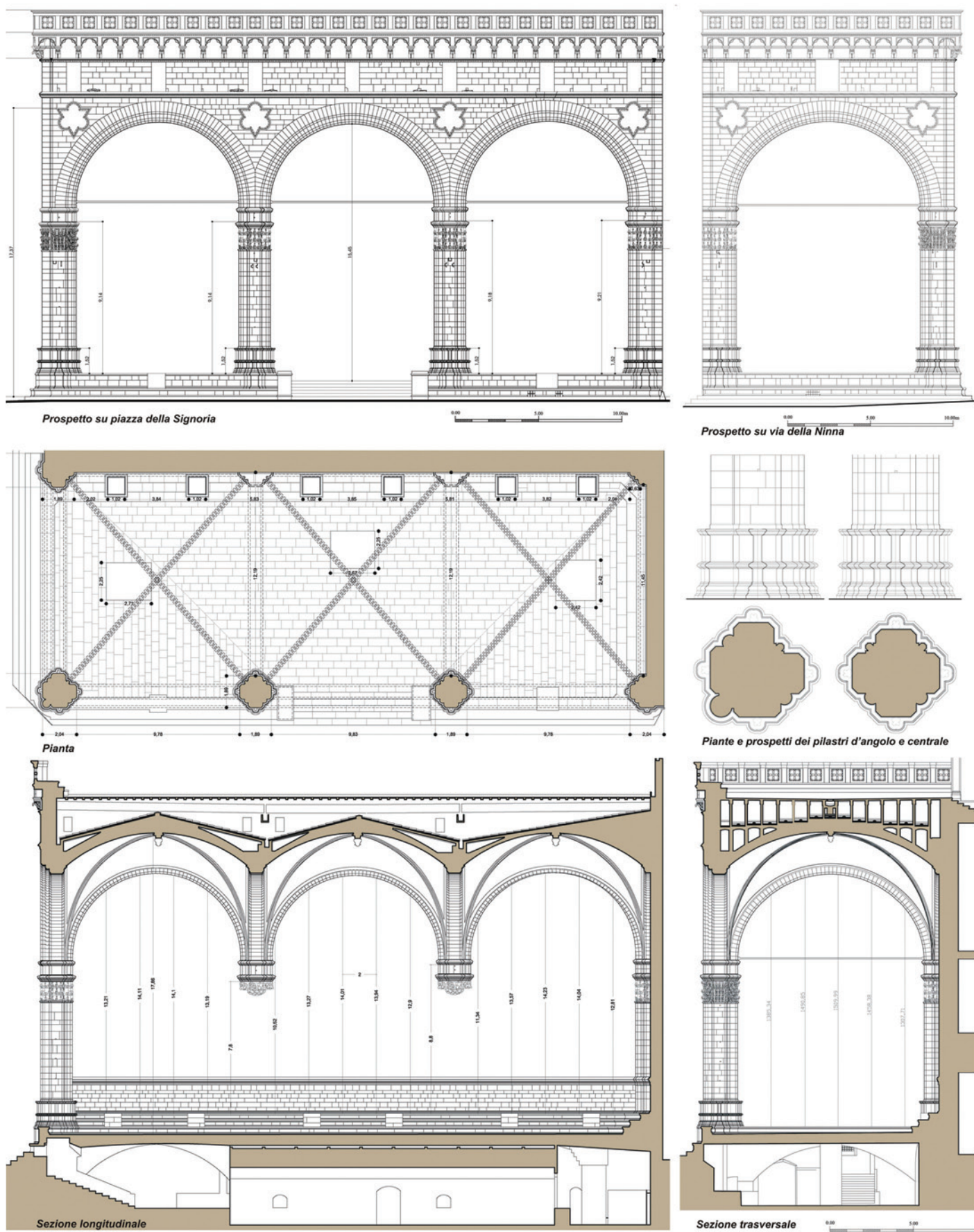


fig. 13 - Relevé intégré de la Loggia de la Signoria à Florence



fig. 14 - La Loggia de la Signoria vue à partir de la place.

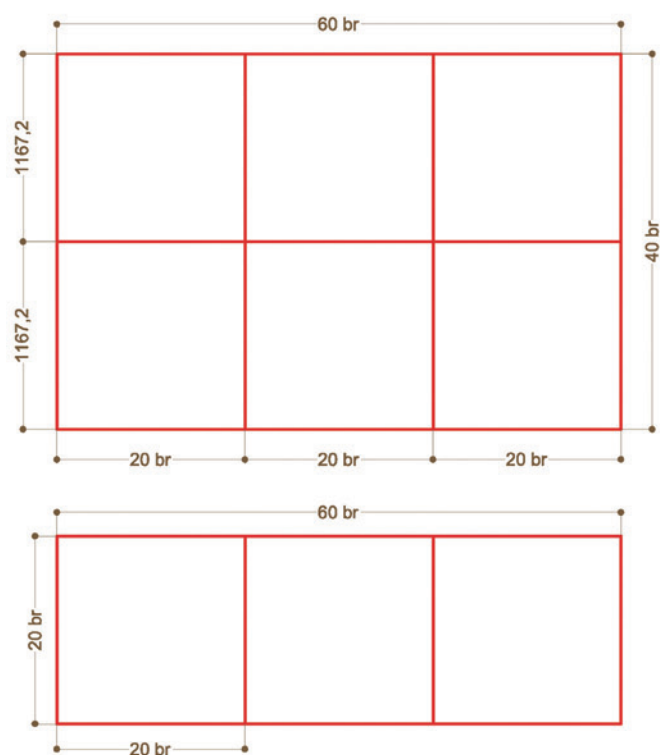


fig. 15 - Schéma 1 du plan et de la façade de la Loggia

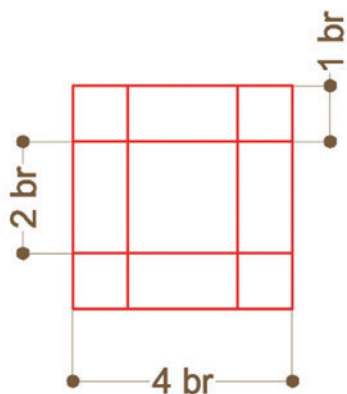


fig. 16 - Grille du pilier en plan

en construction de métrer les travaux, de modifier le projet d'origine ou de l'agrandir en se raccordant toujours au schéma arithmétique-géométrique précédent⁷.

L'analyse métrique de la Loge des Priori a mis en évidence l'emploi de la canna mercantile (canne commerciale) de quatre bras comme outil de mesure pour le dimensionnement du schéma général du projet. Le modèle à l'échelle, dans ce cas spécifique, est obtenu en mettant en rapport la canna mercantile (4 bras florentins = 2,3344 m) avec les sous multiples du bras florentin (0,5836 m)⁸ ; cette méthode permet, à travers un schéma simple et facilement compréhensible, de communiquer la forme et les mesures générales de l'objet architectural. L'échelle de représentation supposée, en ce cas, est de 1 : 60, relation selon laquelle 1 canna mercantile (4 bras, c'est-à-dire 4 x 240 denari) est représentée dans le dessin par 16 denari, c'est-à-dire 1/15 de bras.

Dans cette phase, il convient d'analyser le projet en lui attribuant les mesures réelles en bras florentins. On observera après que l'utilisation de l'échelle 1 : 60 permet aisément de communiquer telles quantités en utilisant un graphique de dimension contenue.

Un module carré de 20 x 20 bras (20 : 4 = 5 canne mercantili) a servi à l'architecte d'élément de départ pour attribuer les mesures à l'objet. La volonté du projeteur d'avoir une façade rectangulaire sur la nouvelle place de proportion 2 : 3 (40 x 60 bras = 10 x 15 canne mercantili) (voir fig. 15) et un plan rectangulaire de proportion 1 : 3 (20 x 60 bras = 5 x 15 canne mercantili), dérive de la décision de réaliser un organisme voûté à trois travées. La conséquence évidente est celle d'avoir une façade tripartite avec des arcs qui à leur tour s'inscrivent dans un rectangle de proportion égale à celui de départ (2 : 3 = 20 x 30 bras = 5 x 7 1/2 canne mercantili) (voir fig. 17). Le choix de la dimension des piliers suit la stratégie qui veut que la somme de tous les pleins soit égale à un vide. Cette relation porte à dessiner un pilier de 4 x 4 bras (1 x 1 canna mercantile).

Si on positionne sur l'axe de la grille (20 x 20 br) de la façade les piliers de la dimension établie (4 bras), on obtient trois vides de 16 bras (1 vide = 4 canne mercantili = 1+1+1 pleins) (voir fig. 18). Pour les raisons précédemment décrites la dimension de la façade sur la place passe de 40x60 br. à 40x64 br. La solution en plan est sous-tendue au fait d'avoir choisi un soutien cruciforme qui doit s'inscrire dans un carré de 4 x 4 bras. Le côté de celui-ci est subdivisé en 1+2+1 = 4bras (voir fig. 16). Il doit être positionné par rapport à la grille générale du plan sur les axes de la longueur ; dans la direction transversale. Les soutiens sont déplacés à l'extérieur, par rapport à l'axe, d'une distance égale à un bras (voir fig. 18). Ainsi la façade sur la place est de 64x40 bras (64 : 4 = 16 cannes divisées en 1+4+1+4+1+4+1 = 16) et la façade sur le côté court est de 26x40 bras (26 : 4 = 6,5canne divisée en 1+4,5+1) (voir fig. 18).

La naissance des arcs de la façade principale se situe à 20br (5 cannes de 4br). Leur portée est de 16 br (4 cannes de 4 br) (voir fig. 19) et leur flèche de $16:2 = 8\text{br}$ (2 cannes), pour une hauteur totale de 28 bras (7 cannes mercantili) Une telle hauteur se conserve sur la façade latérale et l'arc utilisé dans ce

cas est un arc segmentaire, surbaissé de 1 br (la mesure de la portée de l'arc est de 18 br) dont la hauteur est encore huit bras (voir fig. 20).

Il en ressort que l'échelle de 1 : 60° permet de dessiner un schéma de façade sur la place long de 1br + 16 denari et haut de 2/3 de bras. La façade sur Via de la Ninna elle, a une hauteur égale à la précédente et une largeur de 1/3br + 2soldi. Le schéma de plan à la même échelle aura une dimension de (1br + 16 denari) x (1/3 br + 2soldi). Cette échelle de représentation, en mettant en évidence le nombre de cannes de quatre bras, le nombre de bras associés, et la division en quarts de bras (1canna = 16 denari, 1br = 4denari, 1/4 bras = 1denaro) se prête bien à l'élaboration du schéma précédemment décrit.

Le dimensionnement du pilier (base, chapiteau et tronc) est modulé sur les multiples de 5 (voir fig. 19-21). En procédant par ordre, la base à terre mesure 5 br (divisé en 2,5br pour la base totale et 2,5br pour la base du pilier), le tronc 10br, le chapiteau 5 br, la première corniche à 10+1 = 11br et la seconde corniche à 5-1 = 4br. Si on observe les chiffres la volonté d'un rythme de $1/2+1+1/2+1+1/2+1/2 = 4 \times 10 = 40\text{br}$ apparaît clairement. Le même raisonnement peut s'appliquer pour l'échelle du 60°, en effet à cet échelle, 5br (une canne agrimensoria) est égale à 1/12 br (1oncia) en fait $1/12+2/12+1/12+2/12+1/12+1/12 = 8/12\text{br} = 2/3\text{br}$. Les renseignements possibles à l'échelle de 1 : 60°, dans cette phase du projet, sont épuisées.

Pour augmenter le niveau de détails des représentations une échelle plus appropriée devient nécessaire. Celle-ci sera choisie en fonction des quantités métriques que l'on veut représenter.

Une réflexion très pointue sur le problème a mis en évidence une série d'échelles possibles. Le tableau suivant énumère cette série d'échelle utile pour la représentation des objets architecturaux. Ces échelles sont valables seulement dans le cas où l'unité métrique est le bras florentin ou tout autre unité ayant la même structure de multiples et sous multiples. Ces échelles sont :

- Le 1 : 120, 1 bras = 2 denari met en évidence la canne de 5 bras = 1/2 oncia ? ;
- Le 1 : 96, 1 bras = 2.5 denari met en évidence la canne de 4 bras = 1/2 oncia ? ;
- Le 1 : 80, 1 bras = 3 denari met en évidence le tiers de bras, la canne de 5br. = 15 denari et la canne de 4br = 1 soldo ;
- Le 1 : 60, 1 bras = 4 denari mettent en évidence le quart de bras, la canne de 5br. = 1 oncia et la canne de 4br. = 16 denari ;
- Le 1:48, 1 bras = 5 denari mettent en évidence le cinquième de bras, la canne de 5br. = 25 denari et la canne de 4br = 1 oncia ;
- Le 1:40, 1 bras = 6 denari mettent en évidence le tiers et le sixième de bras, la canne de 5br. = 1,5 once et la canne de 4br. = 2 soldi ;
- Le 1:24, 1 bras = 10 denari, la canne de 5br. = 2.5 once et la canne de 4br. = 2 once ;
- Le 1:20, 1 bras = 12 denari, la canne de 5br. = 3 once et la canne de 4br. = 4 soldi ;
- Le 1 : 12, 1 bras = 20 denari = 1 oncia ;
- Le 1:10, 1bras = 24 denari = 2 soldi.

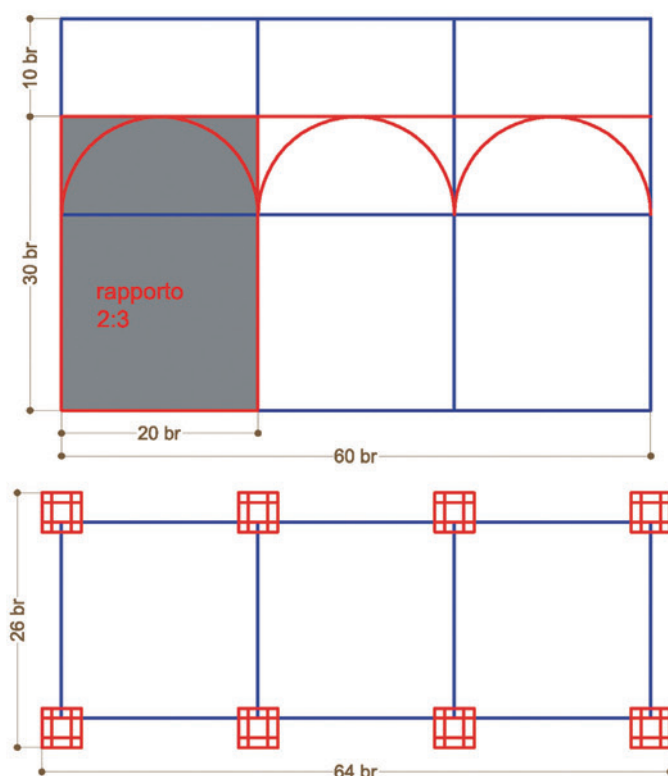


fig. 17 - Schéma 2 du plan et de la façade de la Loggia

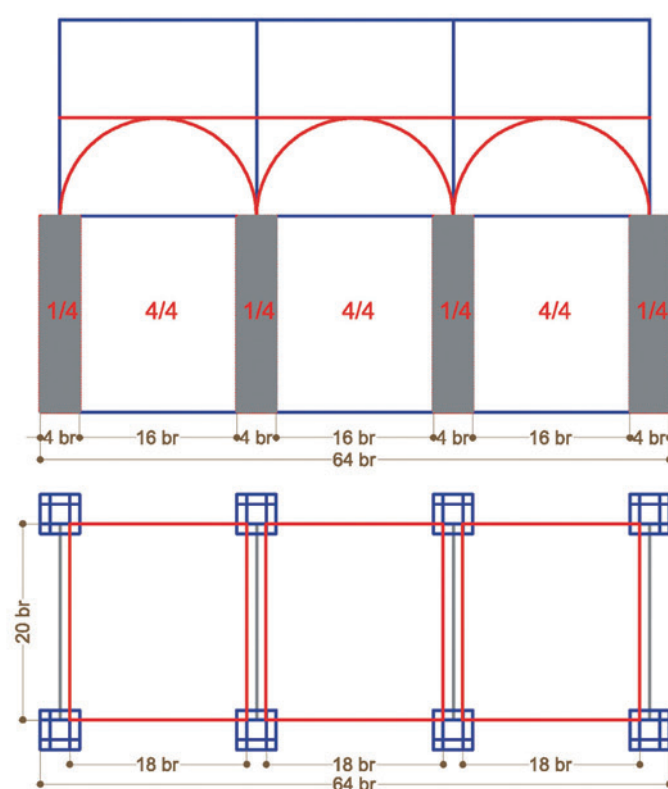


fig. 18 - Schéma 3 du plan et de la façade de la Loggia

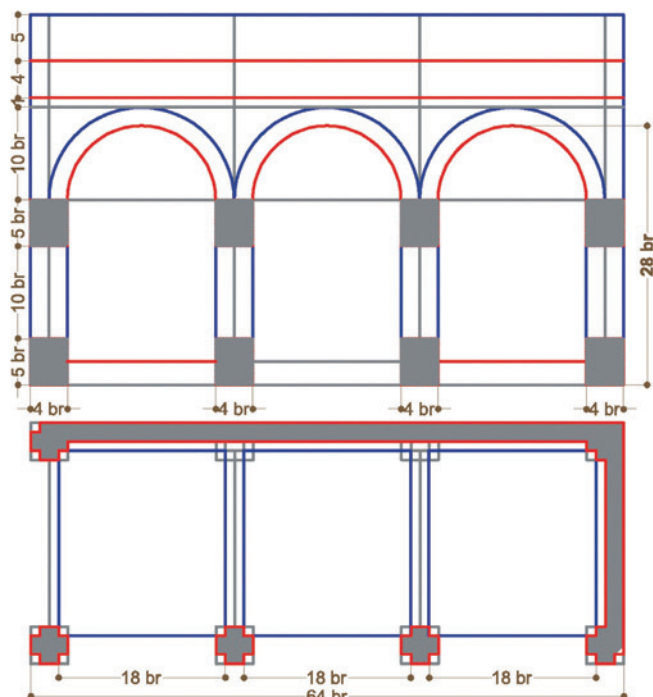


fig. 19 - Schéma 4 du plan et de la façade de la Loggia

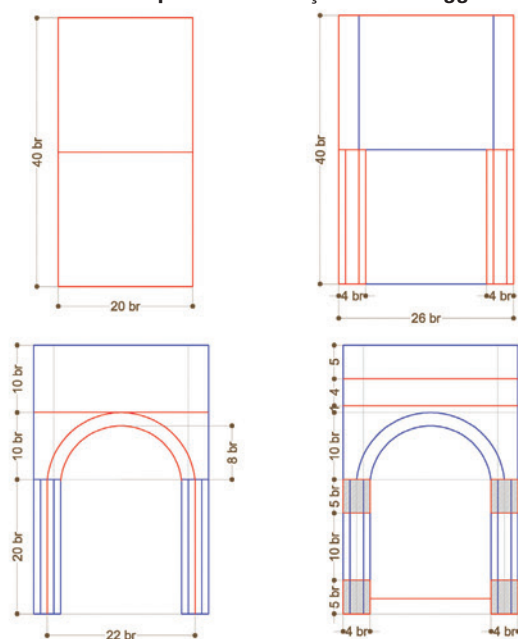


fig. 20 - Schémas de la façade latérale de la Loggia côté Uffizi

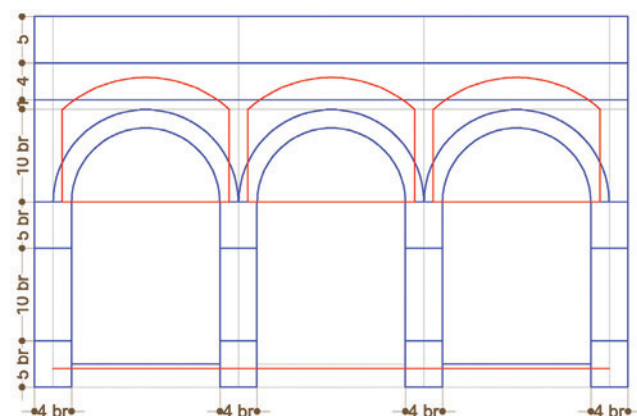


fig. 21 - Schéma de la façade- coupe longitudinale

Dans la gamme des échelles métriques recensées celle qui semble utile pour la description du pilier, attribué par les historiens à Simone Talenti⁹, semble être celle de 1 : 10. Elle met bien en évidence le quart de bras en le rapportant au demi soldo. L'analyse détaillée des mesures du plan du pilier a confirmé l'utilisation d'une grille de module 1/4 de bras et a permis de remonter aux matrices géométriques de sa forme. Dans ce cas, comme pour le schéma général, la thèse d'un probable dessin à l'échelle de 1/10 se confirme. En effet si on considère qu'1/4 de bras est égal au 1/2 soldo (14,59 cm/10 = 1,459 cm x 2 = 2,918 cm = 1 soldo). On peut aisément dessiner le plan du pilier.

Les opérations à accomplir sont simples : on construit un carré de $(2+1/4) \times (2+1/4)$ bras, à l'échelle 4.5 denari (schéma A fig. 24) que l'on divise en 9 carrés plus petits de $3/4 \times 3/4$ br. On les positionne par couples de 8 carrés de la même dimension ($3/4 \times 3/4$ bras) sur les quatre points moyens du carré de départ en le déplaçant d'un $1/3$ br vers l'intérieur (schéma B fig. 24). Pour compléter le dessin il faut dessiner un octogone tel que le côté vertical et le côté incliné à 45 degrés restent dans les $2/4$ br (voir schéma C fig. 25). La construction de l'octogone approché circonscrit par un carré est le point générateur de la forme de ce pilier. La division du côté du carré en 17 parties permet de construire facilement un octogone à travers les numéros 5, 7, 5 = 17. En effet le côté de l'octogone est de 7 denari x 10 = 17,02166 cm. La mesure relevée est bien de 17 cm. (Voir schéma E fig. 26).

Il reste à déterminer le côté des petits octogones d'angle. L'intersection du prolongement des côtés à 45° des premiers octogones déterminés permet de dessiner le côté des petits octogones (fig. 26 schéma F). Celui-ci est égal aux $2/240 \times \sqrt{2} = 0,486333 \text{ cm} \times 17/12 = 0,685 \text{ cm} \times 10 = 6.85$ (la mesure relevée est de 6,8 cm.). Le positionnement du centre du cercle qui remplace l'octogone sur la partie opposée du pilier est obtenu en traçant la circonférence passant par trois points déterminés dans la grille de construction (voir schéma D fig. 25). Le pilier s'inscrit ainsi dans un carré de la dimension de $3+1/4$ bras (fig. 27). La dimension des moulures sera égale à $4 - 3.25 = 3/4 : 2 = 3/8$ bras.

Du Pilier à l'abside

L'observation du profil des piliers d'Orsammichele et de la Loge des Priori a permis de reconnaître une similitude de langage formel avec d'autres piliers cruciformes toscans de la même époque. Les piliers analysés sont, en plus des deux précédemment cités, ceux de la Cathédrale Florentine (Santa Maria del Fiore) de la Cathédrale de Saint Martino à Lucca et ceux de la Cathédrale d'Arezzo (voir fig. 28, 29). Si on compare le profil de l'abside de la Cathédrale de Florence (voir fig. 30,31) avec celui des piliers cités on remarque qu'il existe entre ces illustrations une similitude formelle. On se demande alors si la partie absidale de la Cathédrale florentine a été projetée selon le même principe et si dans ces formes une matrice de pensée commune existe pour mettre en évidence une démarche conceptuelle unique pour une telle solution

formelle. Il est évident que l'abside de la Cathédrale Florentine fut pensée par Francesco Talenti comme un organisme à plan central greffé sur une nef qui appartenait déjà à un projet en cours, celui d'Arnolfo di Cambio. De plus une telle opération n'aurait jamais été possible sans la connaissance de la grille générale utilisée par Arnolfo et sans l'exploitation de celle-ci de la part de Talenti en utilisant un dessin à l'échelle, lui permettant d'assembler le nouveau projet au vieux. ●



fig. 22 - Photo de la base d'un des piliers de la Loggia



fig. 23 - Photo de la place de la Signoria, on voit le rapport entre le Palazzo dei Priori et la Loge.

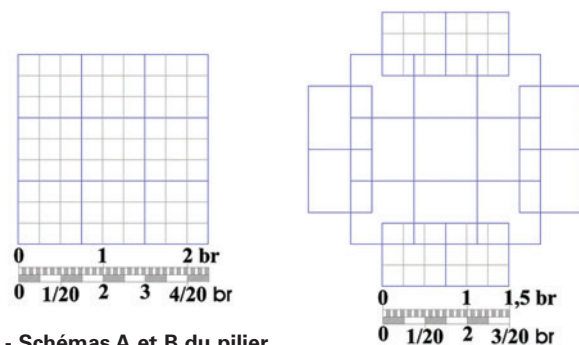


fig. 24 - Schémas A et B du pilier centrale

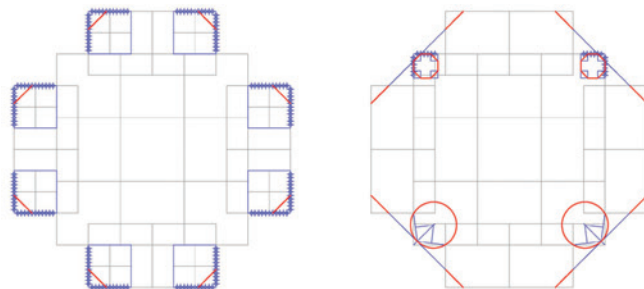


fig. 25 - Schémas C et D du pilier centrale

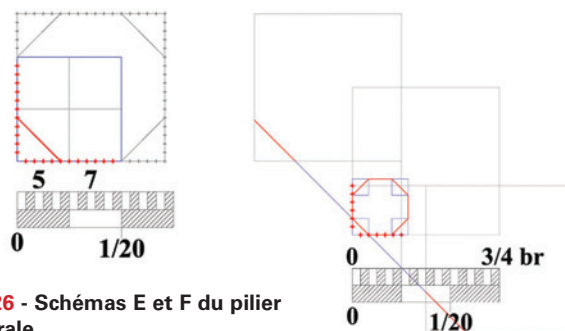


fig. 26 - Schémas E et F du pilier centrale

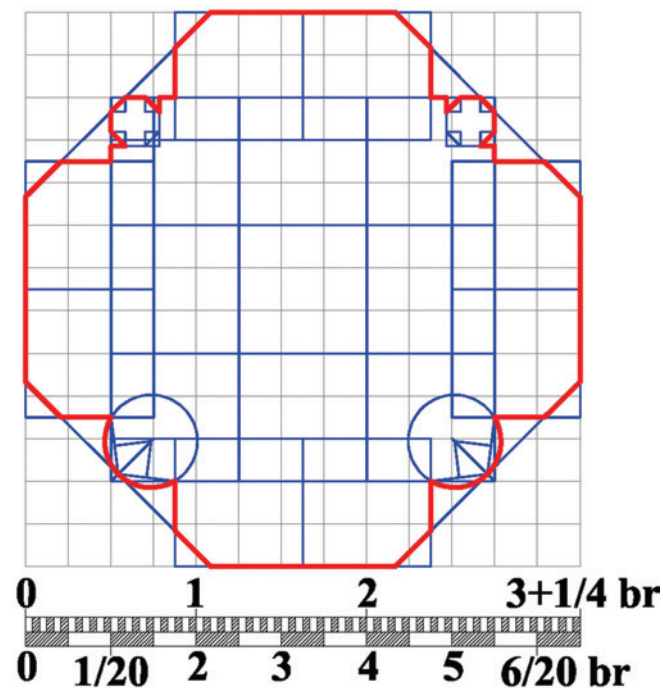


fig. 27 - Schéma G du pilier. En rouge on peut observer le profil en plan

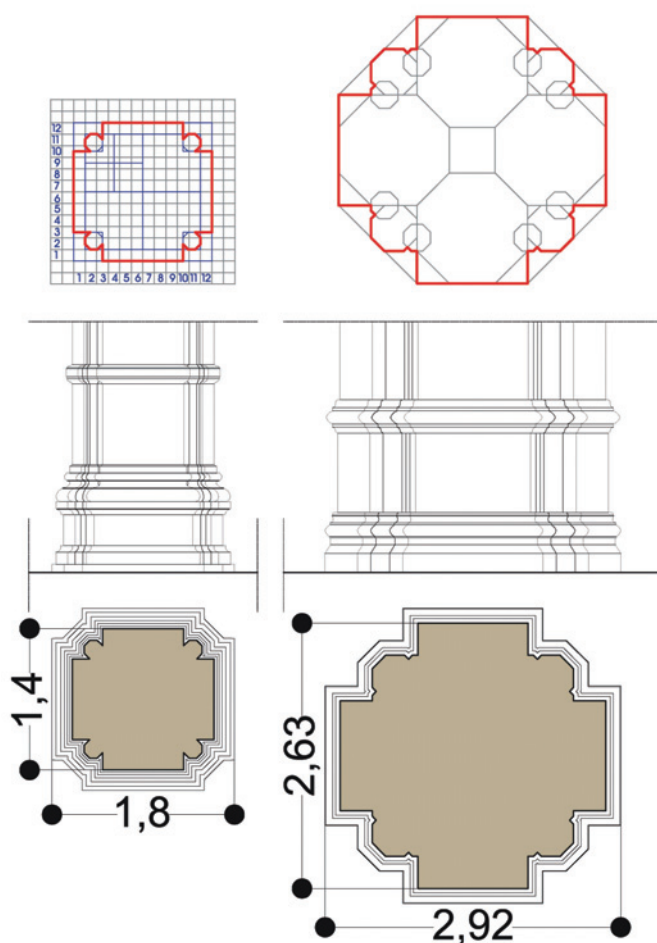


fig. 28 - Relevé et schémas des piliers de Orsammichele et du Duomo de Florence

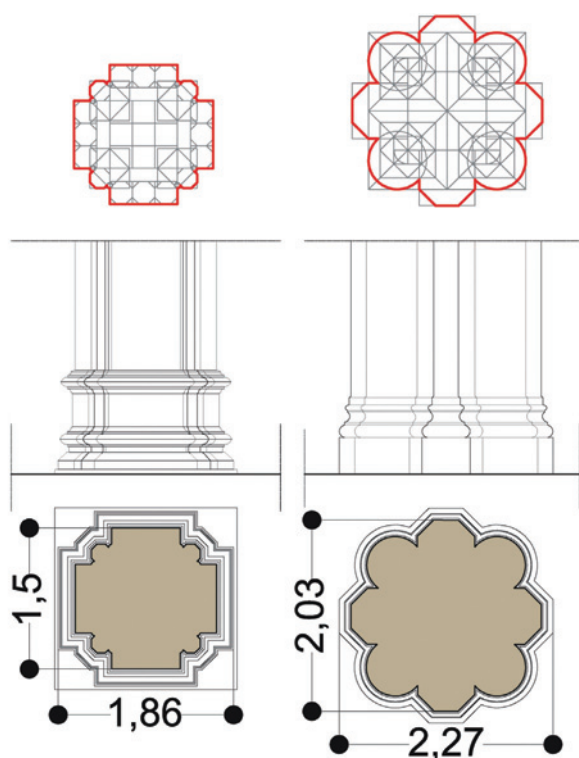


fig. 29 - Relevé et schémas des piliers de San Martino à Lucca et du Duomo de Arezzo

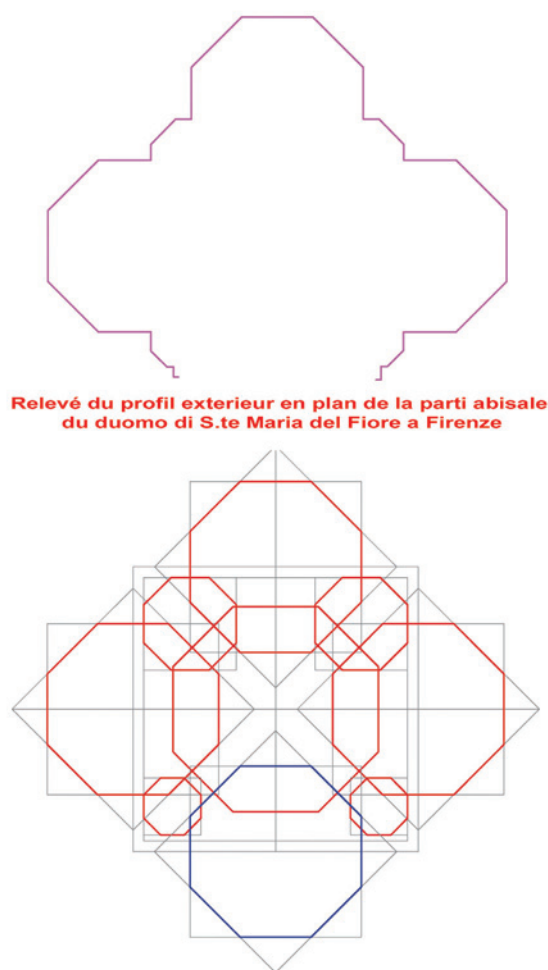


fig. 30 - Profil et schéma de la partie absidale du Duomo de Florence

- 1 Vitruvio, De Architettura Libro III.
- 2 Voir M.T. Bartoli, De canna ferrata
- 3 Talenti et Ristori dès le 14 août 1376, Benci de Cione Dami dès le 10 octobre 1376, Lorenzo de Filippo fut caputmagister en même temps de la cathédrale et de la loge à partir de septembre 1378 jusqu'en 1395.
- 4 Benci di Cione avait assisté Neri di Fioravante lors de l'édification de la nouvelle loge d'Orsammichele, les baies à deux formes qui cloront la Loge d'Orsammichele sont par contre de Simone Talenti
- 5 Première église à être voûtée à Florence et achevée à cette époque.
- 6 Qui en résout le problème de manière novatrice.
- 7 Pour un approfondissement du sujet on renvoie à G. Mele, Article : "Les tracés régulateurs de la cathédrale Florentine", Actes du Congrès International AED "Le dessin de la ville œuvre ouverte dans le temps" Saint Gimignano 28,29,30 juin 2002
- 8 On rappelle que le bras florentin ou bras de panno (58,36 cm) a comme sous-multiples le 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/12, 1/20, 1/240.
- 9 en effet des documents indiquent qu'en octobre 1376 et en novembre 1379, Simone Talenti fut payé pour un grand dessin en couleurs d'un pilier et pour la décoration de feuillages du chapiteau du pilier vers Palazzo Vecchio.

Bibliographie générale

MARCO VITRUVIO POLLIONE, De Architectura, traduzione di L. Migotto, Pordenone, Edizioni Studio Tesi, 1990
A.A.V.V. Carnet de Villard de Honnecourt XIII siècle, Editions Stock 1986.
A. MARTINI, Manuale di metrologia, aree, misure, pesi monete in uso attualmente e anticamente presso tutti i popoli, Torino, E. Loescher, 1883
M. DOCCI, D. MAESTRI, Manuale di rilevamento architettonico e urbano, Bari, Laterza 1994
M. DOCCI, D. MAESTRI, Storia del rilevamento architettonico e urbano, Bari, laterza 1994
M. T. BARTOLI, Le ragioni geometriche del segno architettonico, Firenze, Alinea 1997
E. MANDELLI, Palazzi del rinascimento, dal rilievo al confronto, Firenze Alinea, 1989
F. VOSSILLA, La loggia della Signoria : una galleria di scultura, Firenze, 1995
U. MUCCINI, Pittura, scultura e architettura nel Palazzo vecchio di Firenze, Firenze 1997
B. S. SGRILLI, Descrizione e studi dell'insigne fabbrica, 1997
C. PIETRAMELLARA, S. Maria del Fiore a Firenze : I tre progetti, Firenze, 1984
F. GURRIERI, The cathedral of Santa Maria del Fiore in Florence, 1984
V. CRISPOLTI, Santa Maria del Fiore alla luce dei documenti, 1937
L. BARTOLI, Il disegno della cupola del Brunelleschi, 1994
F. BELLATO, La cattedrale di San Martino in Lucca, Lucca, 1998
AAVV, Arezzo guida della città, Arezzo, 2001
E. MANDELLI, Lettura di un disegno : la pergamena di Siena, n°11 in Studi e Documenti di Architettura Firenze, giugno 1983
M.T. BARTOLI, De canna ferrata, n°2 1997 in Disegnare rivista semestrale del Dipartimento di Rappresentazione di Roma.
G. MELE, I tracciati regolatori della Cattedrale fiorentina, Atti del Convegno Internazionale AED "Il disegno della città, opera aperta nel tempo" San Gimignano 27,28,29 giugno 2002

Contacts

Par Giampiero MELE, Architecte
Dipartimento di Progettazione dell'architettura di Firenze
IPRAUS, École d'Architecture de Paris-Belleville
JJ_mele@hotmail.com



fig. 31 - Photo de la partie absidale du Duomo de Florence

ABSTRACT

The Loggia of Priori represents one of the earliest examples of a political loggia. The project, in plan and elevation, was conceived on a series of grids which on the various scales help the planner to redistribute the quantities at the moment of the definition of the model details. The hypothesis explained here considers the existence of diagrams in plan (icnographia) and elevation (orthographia) which were obtained through arithmetical-geometrical reasoning combined with Inventio (according to Vitruve) and which gave the possibility of communicating, on the various scales, metric form and quantities through the drawings. The metric analysis of the Loggia of Priori highlighted the employment of the canna mercantile di 4 braccia as the measuring instrument for the dimensioning of the general outline of the project. The scale of the model, in this specific case, was obtained rationing the canna mercantile (4 florentines braccia = 2,3344 m) with the under multiples of the Florentine braccio (0,5836 m). This method allows, through a simple and easily comprehensible diagram, to communicate the shape and the general measures of the architectural object.

De l'eau pour Ivondrona

■ Florent DESSENS

Première mission d'une série que nous espérons longue, le partenariat GSF-ESGT International a débuté son existence sous les cieux malgaches en poursuivant une mission GSF 2002. L'expérience et les relations des uns alliées à la fougue et à la disponibilité des autres dans le cadre d'une mission bénévole ne peuvent que réussir et motiver les partenaires financiers qui donnent les moyens de réaliser de tels projets. Merci à eux tous.

François BODIN

ESGT-International, une association de l'Ecole supérieure des géomètres et topographes du Conservatoire National des Arts et Métiers, a réalisé pour sa première année d'exercice une mission humanitaire à MADAGASCAR. Quatre de ses membres ont participé au consortium autour du projet "de l'eau pour Ivondrona" afin de réaliser un programme d'adduction en eau potable.

Ce groupement comprenait :

- l'association IDEES, Ingénieurs pour le Développement Et les EchangeS, (association d'aide au développement créée en 1994 par un groupe d'élèves ingénieurs de l'ESME-Sudria dans le but de participer au développement et à l'amélioration des conditions de vie de la commune malgache d'ALAKAMISY-AMBOHIMAHA),
 - GSF, Géomètres sans Frontières,
- Avec le soutien de : Thalès navigation, JS Info, FIT, France Ingénierie Topographie, l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes

C'est dans la région d'ALAKAMISY-AMBOHIMAHA que quatre villages rassemblant près d'un millier de personnes ont été équipés durant l'été 2003.

Juchés à flanc de montagne, dans des habitations sommaires, la population pourra désormais bénéficier des bienfaits de l'eau potable et notamment espérer une baisse significative de la mortalité infantile.

La solution technique proposée pour l'apport de l'eau potable se décompose en plusieurs étapes. Tout d'abord, un captage récupère les eaux de source. Une conduite achemine alors l'eau en contrebas dans une citerne où un traitement chimique est pratiqué quotidiennement.

Enfin, la citerne est raccordée à une borne fontaine au sein du village où les habitants viennent se servir.

Le rôle de l'équipe sur place était de réaliser les études nécessaires au passage des conduites, déterminer le meilleur cheminement, implanter le tracé des tranchées, contrôler la profondeur de pose afin de conserver l'écoulement gravitationnel et enfin effectuer le levé topographique du passage de la canalisation. ●



Luis Tomasello : le

■ Jean-Pierre MAILLARD

Meaux, altière sous-préfecture de Seine-et-Marne, est connue par la renommée de son ancien évêque Jacques Bénigne Bossuet, dont on célèbre en 2004 le tricentenaire de la disparition, et par ses spécialités culinaires, notamment celle du fromage de Brie qui porte son nom.

Au-delà de ces célébrités, la ville est riche d'un patrimoine conséquent et divers. De construction récente, le centre administratif reçoit, lui aussi, des interventions plastiques réalisées dans le cadre de la politique du 1 % culturel qui complètent la collection meldoise.

Dans ce cadre, le palais de justice a servi d'écrin à une réalisation de Luis Tomasello qui s'offre au regard dès l'entrée dans l'édifice. Le bâtiment, œuvre des architectes Thierry Gruber et Xavier Menu, a été inauguré en 1986 par le ministre de la justice d'alors, Robert Badinter et par Paul Séramy, le président du conseil général, car une maîtrise d'ouvrage déléguée est une autre particularité de la construction. Pour mettre en valeur l'équipement, les architectes sont convenus avec Luis Tomasello d'implanter son projet au milieu du hall du palais de justice. Définitivement central, à l'origine agrémenté d'un voile d'eau, le "mural" s'impose aux visiteurs dès la porte et profite de la lumière zénithale provenant de l'étage supérieur. Cette situation satisfait l'attente de Luis Tomasello qui préfère tout particulièrement cette lumière venant du ciel. En effet, au fil du jour, elle anime son œuvre et met en valeur son travail.

Le mur du tribunal de grande instance

Il s'agit d'un haut relief cinétique dont, par définition, la perception change selon le point de vue et l'éclairage. Sur un support de plus de quatre mètres de coté, plusieurs figures géométriques parfaitement symétriques (carrés, triangles) sont dessinées en pointillé à l'aide de cubes

de la taille d'un petit pavé. C'est près de huit cents unités qui ont été ordonnées le long de lignes orthonormées et de diagonales. La position des cubes varie selon les sous-ensembles pour capter la lumière de façon différente. Fixés par une arête ils sont orientés, sous-ensemble par sous-ensemble, suivant une même direction. La conservation laisse à désirer. Outre le fait qu'un bon coup de karcher rendrait au marbre son apparence d'origine, on observe déjà la disparition d'une dizaine de cubes.

Au-delà de ces considérations formelle et de gestion, le mur de Luis Tomasello répond aussi à la fonction des lieux que le plasticien a largement pris en compte. Les deux axes de composition, l'un horizontal et l'autre vertical suggèrent la balance de la justice. La rigueur géométrique impose l'équilibre, appelle à la sérénité, et doit inciter à l'équité. Le choix du marbre comme matériau souligne aussi la pérennité de l'institution judiciaire. La couleur claire du marbre a été volontairement conservée pour éviter toute agressivité. Le voile d'eau depuis longtemps hors service invitait à l'apaisement dans un lieu où les passions humaines sont souvent à l'épreuve. On peut regretter, dans un palais de justice comme dans tout autre espace public, qu'il soit bien difficile d'entretenir une fontaine trop souvent malgré elle à usage de cendrier si ce n'est de poubelle.

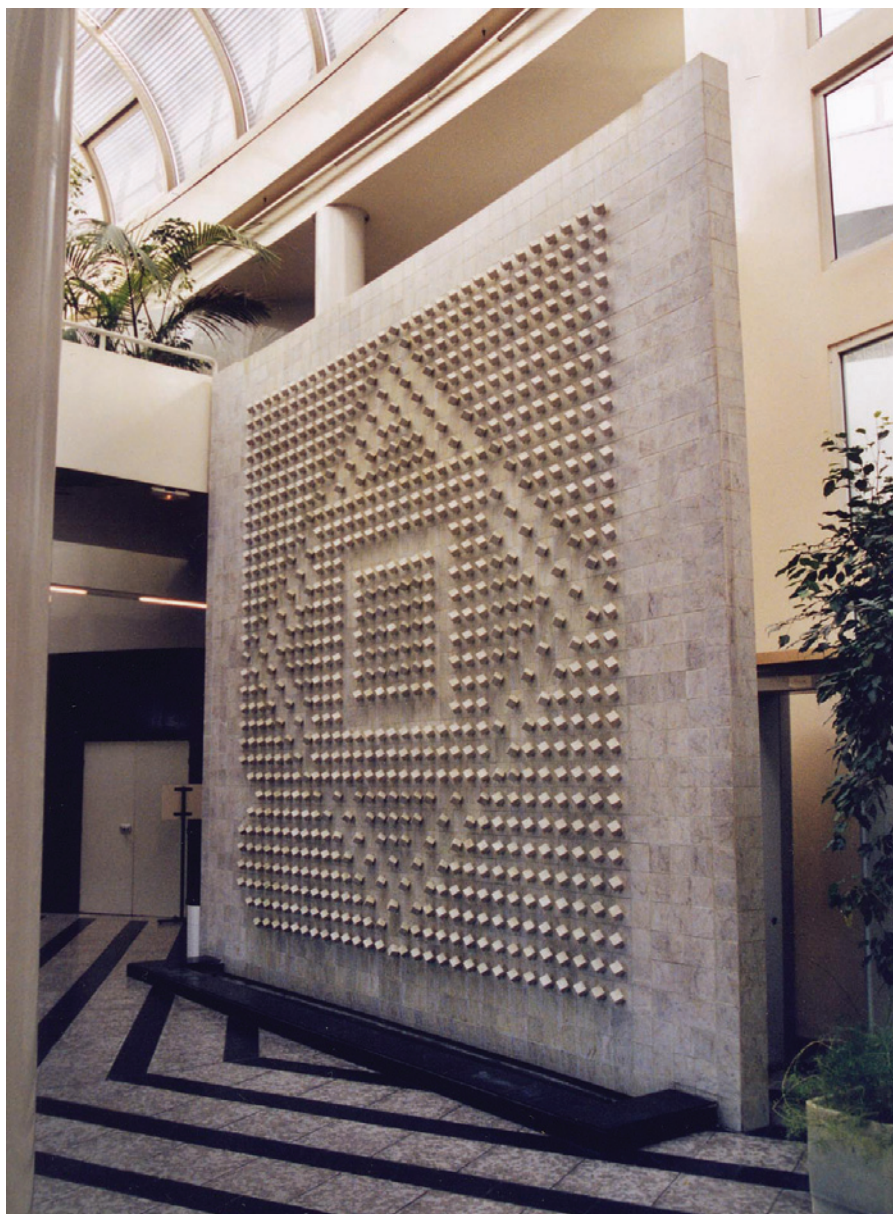
Atmosphère mobile chromoplastique

Luis Tomasello nomme ainsi les objets, tel le mural de Meaux, qui unissent la sculpture et la couleur, même monochrome. Ses créations plastiques sont

par ailleurs toutes susceptibles d'être intégrées à l'architecture. A titre d'illustration, en France, on les trouve aussi bien au palais des congrès de la Porte Maillot à Paris que sur des pignons d'immeuble à Grenoble, à l'Isle d'Abeau, à Val de Reuil...

Une recherche originale a abouti à leur conception. L'artiste l'explique fort bien dans un recueil poétiquement intitulé "Una mano enamorada". Pour lui le drame de la peinture concrète était et continue d'être le maintien des couleurs dans un plan. Cela produit une illusion par un double jeu de perspectives, une à partir du plan en profondeur, l'autre depuis le plan jusqu'au spectateur. Pour lui les possibilités de nouvelles expressions sur un plan sont depuis longtemps épuisées. Alors il s'est convaincu que cette perspective illusoire devait devenir réelle. C'est ainsi qu'il a été amené à travailler en trois dimensions, puis en quatre par l'introduction du mouvement même si, vu de face, ironie de la démarche, l'uniformité du relief peut créer l'illusion du plan... Le cube s'adapte parfaitement à la capture de la lumière, puisque ses six faces sont libres dans l'espace. Selon l'incidence de la lumière, une des faces la reflète avec une plus grande intensité et, par exemple, un blanc sera plus blanc que blanc. De même, la peinture des faces cachées se reflètera sur le support et se projettera dans l'espace en colorant l'alentour, atmosphère qui peut être ainsi qualifiée de chromoplastique. Que voilà une peinture réfléchie ! Pour Julio Cortázar, l'écrivain ami du plasticien, Luis Tomasello ordonne le désordonné, peigne minutieusement la chevelure de la lumière et libère les émotions de la matière. Il précise sa pensée en écrivant au sujet de l'artiste : "Cet alchimiste n'a pas cherché à congeler la lumière en matière précieuse, mais tout le contraire : chez lui l'objet solide et immobile se dilate en lumière et couleur, tremble dans l'espace, bat du cœur même de celui qui le regarde."

carré dans le marbre



Jean-Pierre Maillard

Biographie

Luis Tomasello est né en 1915, de parents italiens, à La Plata en Argentine. Durant sa jeunesse, le jour il aide son père comme ouvrier du bâtiment et la nuit il étudie le dessin. En 1938, il obtient le diplôme de professeur et commence sa vie d'artiste.

Entre 1945 et 1950 il exprime un art figuratif qui s'intéresse à la personne humaine, aux natures mortes et aux pay-

sages qui sont traités à la façon de Cézanne. Son voyage en Europe de 1951 constitue une véritable initiation, formation fondamentale pour son devenir d'artiste : c'est à Chartres, devant les merveilleux vitraux médiévaux de la cathédrale que Luis Tomasello a eu l'intuition de la couleur-lumière.

A Paris il se confronte aux nouvelles expressions artistiques dont, en Argentine, il n'avait qu'une connaissance théorique. Dans son pays, durant

les années suivantes, Tomasello réalise des œuvres dans un langage que modèle désormais l'influence du cubisme et de l'expressionnisme pour enfin passer à l'abstraction avec une prédilection pour les formes géométriques. En 1957, Tomasello s'installe définitivement à Paris où il est introduit dans le milieu de l'abstraction géométrique, notamment celui de Jean Arp, de Michel Seuphor, et des tenants du cinétisme Vasarely, Soto et Schöffer entre autres. En 1962, deux expositions personnelles majeures sont organisées, l'une à Buenos Aires au Musée des beaux-arts, l'autre à Paris à la galerie Denise René. Depuis ce moment l'artiste est reconnu et exposé dans le monde entier.

Sa passion et son œuvre sont magnifiquement récompensées par l'initiative de la ville de Buenos Aires qui lui consacre un musée dont il suit activement les aménagements en cours. Infatigable, Luis Tomasello continue aujourd'hui encore à travailler dans son atelier de Paris, toujours avec les mêmes rigueur et minutie, dans sa recherche de perfection minimaliste. On aura compris qu'il s'emploie à "faire le maximum avec le minimum" tous comme ses maîtres, Mondrian et Malevitch. ●

Hommage à Piotr Kowalski

Début janvier 2004, Piotr Kowalski est mort à Paris. Il avait 76 ans. Artiste, "un mathématicien converti à l'architecture expérimentale et à la sculpture" comme le déclare le ministre Jean-Jacques Aillagon, il est le concepteur de l'Axe de la terre à Marne-la-Vallée, cette flèche étincelante tournée vers l'Etoile polaire.

Art et géométrie tient à honorer son œuvre d'autant que sa réalisation à deux pas de l'ENSG a été, dans le n° 85 d'xyz, son premier sujet et l'inspirateur de la rubrique. C'est donc avec des sentiments de reconnaissance, d'admiration et de tristesse que je salue sa mémoire.

JPM