

xyz

Éditée par l'
Association
Française de
Topographie

n°115

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

4^e FORUM DE
LA TOPOGRAPHIE
ET DOSSIER SIG

Page 14

Les coordonnées géographiques au temps de Claude Ptolémée

Par Pierre HERMMANN et Robert VINCENT

Directeur des publications

André Bailly
Ingénieur Géomètre ETP

Directeur adjoint des publications

Emmanuel Natchitz
Enseignant-Chercheur ESTP

Rédaction et administration XYZ

107, rue de la Boétie - 75008 Paris
Tél. 01 43 98 84 80
Fax 01 42 25 41 07

Rédacteur en chef

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

Comité de Rédaction

Stéphane Durand
Enseignant-Chercheur - ESGT Le Mans

Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg

Michel Kasser
Professeur des universités
Directeur ENSG - Marne-la-Vallée

Tania Landes
Maître de Conférences
INSA de Strasbourg

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité : Samuel Guillemain

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

Conception et maquette

Dorothée Picard

Autre publication : L'annuaire de l'AFT

ALBEDIA IMPRIMEURS

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

Dépôt légal

2^e trimestre 2008 ISSN 0290-9057
N° CPPAP : 01 11 G 80 866

Tirage de ce numéro : 1600 ex

Abonnement annuel

France CEE : 83 €

Etranger (avion, frais compris) : 86 €
Les règlements payés par chèques
payables sur une banque située hors
de France doivent être majorés de 10 €,
sauf à utiliser l'identifiant international
de compte IBAN

FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048
Le numéro : 23 €

Le bulletin d'adhésion est en p. 75

Membre du SPCS Syndicat de la
Presse Culturelle et Scientifique

L'AFT n'est pas responsable des opinions

émises dans les conférences qu'elle
organise ou les articles qu'elle publie. Tous
droits de reproduction ou d'adaptation
strictement réservés.

Couverture : © CNRS Photothèque/IAP -
MOUETTE Jean - UPR341 - INSTITUT
D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS (IAP) - PARIS
Eclipse totale de soleil du 21 juin 2001 observée
en Angola. Cette image filtrée montre la
couronne solaire dans toute son étendue. Elle
met en évidence, grâce aux propriétés du filtre
neutre radial, sa structure magnétique après
soustraction de l'effet omniprésent de la gravité
solaire. L'AFT remercie le CNRS pour la mise à
disposition de ce document.

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres)

107, rue de la Boétie - 75008 Paris - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 42 25 41 07

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

Editorial 5

Info-Topo

> Les informations de la profession 7

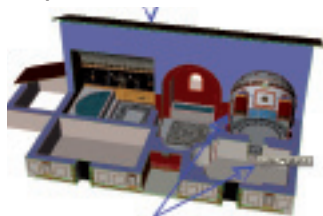
Carnets de voyage

> L'INSA en Suède : technique et culture 12

Dossier SIG : 4^e forum de la Topographie



> 2^e prix du concours AFT 2007
Réalisation de représentations bi- et
tridimensionnelles interactives pour
un Système d'Information Archéologique



Céline PIACENTILE 15

> Le point sur le GMES

Yves RIALANT 20

> Géoréférencer par-delà les frontières,
un nouveau défi du SITG

Laurent NIGGELER 22

> La maquette virtuelle 3D au service
de l'aménagement du territoire

Stéphane GOURGOUT 24

GPS

> Comparaison du positionnement temps réel
classique RTK et du positionnement GPS temps
réel réseau - Mise en œuvre dans le réseau
ORPHEON

Laurent MOREL - Stéphane DURAND 29

> La mesure de l'exactitude d'un récepteur GPS

Charles DEBOUCHE - Katia BERGHMANS
Jean-Jacques CLAUSTRIAUX 39

Cartographie

> Évaluation de l'érosion sur la côte atlantique
argentine : Zone Necochea-Quequén

Paula M. TRISTÁN - Jorge H. DOORN -

Ruben S. WAINSCENKER - José F. ZELASCO 45

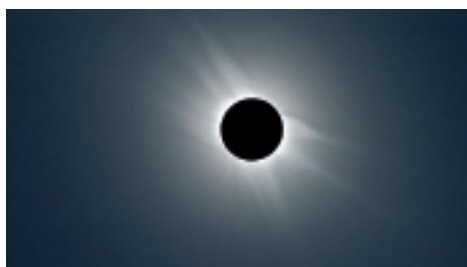
Génie Civil

> Guidage et commande de machines de chantier
De l'implantation statique à celle cinématique

Werner STEMPEHUBER - Hilmar INGENSAND -

traduction : François GIGON - Florence VAUDAN 50

Histoire



© Matern LINDER

> Coordonnées répertoriées dans la Géographie
de Claude Ptolémée - Une explication
vraisemblable de la surévaluation des longitudes
par l'observation des éclipses de Soleil

Pierre HERRMANN 59

> Vérification probante de l'hypothèse
de la détermination des différences de longitude
par l'observation des éclipses de Soleil au temps
de Ptolémée Application à l'éclipse du 11 août 1999

Robert VINCENT 68

Art et Géométrie

> Gilles Perez :
une galerie à ciel ouvert

Jean-Pierre MAILLARD 70



GSF

> Plus important que le relais
de la flamme olympique ?

François BODIN 72

Livres

..... 74

Pour la recherche de nos annonceurs consulter la page 75.

PROCHAIN XYZ - n° 116

Positionnement de puits déviés

La méridienne de France et
sa prolongation jusqu'aux Baléares

Depuis une dizaine d'années le grand public se familiarise aux moyens de la topographie jusque-là réservés aux spécialistes. Ce fut d'abord les randonneurs qui ont adopté le GPS.

Ensuite les automobilistes se sont équipés de navigateurs embarqués qui associent positionnement par GPS et système d'information géographique avec parfois la possibilité d'afficher des vues perspectives sommaires du paysage. Simultanément les internautes, soit la moitié des foyers français, obtiennent la possibilité croissante de consulter des sites de SIG et de "faire de la Géomatique" sans le savoir : Google Earth, Géoportail, Via Michelin, les Pages Blanches avec Mappy, et depuis quelques mois le Plan cadastral. La puissance et la rapidité des micro-ordinateurs domestiques permettent maintenant au grand public de découvrir sur certains de ces sites des applications SIG en trois dimensions.

L'utilisation des SIG avec des versions 3D est donc en plein développement et il était opportun et intéressant d'y consacrer le 4^e Forum de Topographie qui s'est déroulé le jeudi 27 mars à Cachan dans de tous nouveaux locaux du campus de l'ESTP.

Trois conférenciers ont successivement : fait le point sur l'état de l'art en la matière, présenté la nouvelle version de Géoportail en 3D et montré le processus de réalisation du SIG 3D de la Ville de Montpellier. Au cours de l'après-midi, la plupart des exposants se sont succédé à la tribune pour présenter leurs principaux produits à un public attentif et fourni.

Il a ainsi été possible de mesurer le développement croissant des logiciels combinant cartographie, photographies aérienne et terrestre et conçus pour proposer aux usagers des reconstitutions de plus en plus fidèles de paysages à différentes échelles et pas uniquement urbains. Les besoins sont militaires, architecturaux, urbanistiques et même politiques. Il semble évident, en ce qui concerne les SIG en 3D, que l'aspect métrique s'efface au profit de l'aspect figuratif qui tendra à devenir de plus en plus réaliste. Ainsi, à titre d'exemple, la présentation d'un projet urbain au public, avec des vues perspectives simulant le survol d'une maquette, peu ainsi grandement aider à sa compréhension.

L'AFT remercie tous les participants au forum, adhérents, étudiants, exposants, conférenciers, professionnels et sait gré à l'ESTP et à Serge Eyrolles, son directeur, de l'accueil qui lui a été réservé.

Le présent n° d'XYZ complète le dossier SIG paru dans son n° 114, dossier qui a servi de support à la manifestation.

Il comporte aussi un article de Pierre Herrmann. L'auteur, par une enquête fouillée aux origines de la géographie et de l'astronomie commente et salue le travail des cartographes anonymes de l'Antiquité, au regard de leur peu de moyens. Il avance surtout une hypothèse crédible expliquant, par l'utilisation des éclipses de Soleil, la déformation générale des cartes de l'époque qui figurent des longitudes exagérément dilatées par rapport aux latitudes. De là à penser, avec Raymond D'Hollander, qu'en 1492 ces données erronées aient engagé Christophe Colomb à tenter l'aventure du cap à l'ouest pour rejoindre l'Orient avec la suite que l'on connaît ...

Roger SERRE

■ Suisse : e-geo.ch, une part de l'e-Government

Le projet e-geo.ch vise à la création d'une infrastructure nationale de données géographiques (INDG) pour permettre à un plus large public la pleine utilisation des informations géographiques disponibles, informations qui constituent un bien économique de premier rang et un prérequis au bon fonctionnement d'une démocratie.

Un récent classement international a montré que la Suisse est en retard dans l'accessibilité en ligne des prestations administratives. Ce constat a conduit à une concertation et une collaboration des trois niveaux institutionnels suisses (fédéral, cantonal, communal) et à l'élaboration d'un programme de cyberadministration : l'e-government.

Le projet e-geo.ch s'inscrit parfaitement dans l'e-government ce dernier étant suivi par un comité de pilotage mis en place le 30 novembre 2007 et composé de représentants des trois institutions. Le projet e-geo.ch est également encadré par un comité de pilotage spécifique élargi aux représentants de l'Organisation suisse pour l'information géographique (OSIG). L'avancement des travaux s'accélère car la loi sur la géoinformation doit entrer en vigueur le 1^{er} juillet 2008.

► Pour tout renseignement : www.e-geo.ch

■ Galileo prend son envol

Le dimanche 27 avril 2008 une fusée russe Soyouz a été lancée de Baïkonour (Kazakhstan). A son bord, le satellite expérimental baptisé Giove-B contient le système de radionavigation européen Galileo qui a été mis en orbite à 23200 km d'altitude. D'un poids de 500 kg, conçu par Astrium et testé par Thales Alenia, le satellite a déployé correctement ses panneaux solaires et rejoint ainsi, deux ans plus tard, Giove A porteur du premier test du projet Galileo.

Giove B, quasiment identique aux satellites qui alimenteront la constellation Galileo, va notamment permettre de vérifier le fonctionnement des horloges atomiques ultraprécises, ne perdant pas plus d'une nanoseconde par jour.

Cette réussite redonne confiance dans le projet puisque Giove A arrive bientôt



en fin de vie. En effet, pour conserver le droit d'émettre sur les fréquences allouées, il est nécessaire qu'une continuité des émissions soit assurée.

La prochaine étape spatiale de Galileo sera le lancement des quatre premiers satellites opérationnels d'ici 2010. Une fois leur positionnement validé et leur fonctionnement avéré, les lancements se suivront à rythme rapide pour atteindre une constellation de 30 satellites.

Le démarrage officiel et opérationnel des activités de Galileo est fixé à 2013.

► Pour tout renseignement : ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo

■ Annonces STAR-APIC

Un accord de partenariat a été signé le 3 mars dernier entre le Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection de l'Université de Liège et le groupe STAR-APIC. Il prévoit, pour une durée de 3 ans, la réalisation d'une série d'objectifs visant, d'une part, à soutenir la recherche et le développement au sein de l'Université dans les domaines SIG et, d'autre part, à familiariser les étudiants, les stagiaires et les collaborateurs du laboratoire de l'ULg à l'utilisation pratique d'outils.

Par ailleurs, le groupe STAR-APIC et son partenaire THEOME ont remporté le marché lancé par la Province Sud de Nouvelle-Calédonie, pour la mise en place de son Système d'Information Géographique fédérateur. Le déploiement de la solution a d'ores et déjà débuté et la première mission d'installation a permis de déployer le géoportail provincial avec les données au 1/10 000^e, les orthophotoplans et le parcellaire foncier de la Province Sud. L'interfaçage de la solution avec les services et partenaires équipés de solutions SIG tierces devrait être achevé fin 2008.

► Pour tout renseignement : www.star-apic.com

■ Si la mesure m'était comptée

Depuis le 11 avril 2008 et jusqu'au 22 février 2009, le muséum d'histoire naturelle Henri-Lecoq de Clermont-Ferrand présente une exposition "Si la mesure m'était comptée".

La fermeture en 2005 du musée du Ranquet dans la même ville a conduit le muséum, affectataire d'une part significative de ses collections, à créer un nouveau département dédié à l'Histoire des sciences et techniques. Celui-ci est déjà riche de machines arithmétiques, de nombreux instruments de mesure et autres objets scientifiques. L'inventaire réalisé localement est encouragé par le Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) qui a élargi le champ d'investigation du muséum Henri-Lecoq en inscrivant son action dans le programme national de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain. Ainsi le muséum participe à la mission confiée par le ministère de la recherche au CNAM.

Le thème retenu pour l'exposition invite à voyager, au fil des époques par étapes progressives, dans le monde de la mesure. Pour mieux le comprendre et l'appréhender, l'Homme s'est mesuré depuis toujours à son environnement et l'a rapidement mesuré. L'évolution rapide des instruments de la période contemporaine montre que progrès technologique et progrès scientifique sont indissociables. De même, la mesure est devenue un outil incontournable de la connaissance des sciences de la nature.

Dénombrer, compter, calculer, mesurer, uniformiser... quel programme !

► Pour tout renseignement : museelecoq.clermont-ferrand.fr
www.patsrec.fr



■ Le Cadastre a deux cents ans

Pour marquer l'anniversaire de la création du Cadastre en France, l'Université Paris XII Val-de-Marne a organisé une table ronde et une exposition dans les locaux de la bibliothèque universitaire en collaboration avec la Direction générale des impôts (DGI), le Département du Val-de-Marne, l'IGN et l'ESGT.

Le 16 avril 2008, autour de Gilles Palsky, Albert Rigaudière, Mireille Touzery, Florence Bourillon, Nadine Vivier et Pierre Clergeot ont tracé à grands traits l'histoire de l'institution fiscale qui n'a pas forcément représenté les territoires de façon rigoureuse. Malgré leur possible inexactitude les plans de section, dont il ne faut jamais oublier l'échelle autrement dit la précision correspondante, sont pour l'historien une source d'information parfaitement exploitable et appréciée. Il aura pourtant fallu attendre les années 1930 pour que naisse l'intérêt des universités pour les documents cadastraux à la suite de la publication de l'ouvrage de Marc Bloch "Caractères originaux de l'histoire rurale française". Il a aussi été regretté que Napoléon ait privilégié l'aspect fiscal du Cadastre car, dans plusieurs autres pays, la qualité des documents graphiques a permis de leur donner une valeur juridique.

Enfin, les intervenants ont salué la récente mise en ligne du cadastre sur Internet et pris acte du compromis CNIL/DGI sur la communication informatisée des données personnelles sur un territoire limité à celui de la commune.

L'exposition a rassemblé de nombreux matériels et appareils topographiques, des documents graphiques remarquables et une vidéo documentaire très didactique.

► **Pour tout renseignement :**
www.univ-paris12.fr

■ Des photos aériennes... depuis le sol !



AltiClic est depuis trois ans une entreprise spécialisée dans

la photographie aérienne avec la particularité de n'avoir pas besoin d'avion... Cette société dispose d'un matériel adapté mis au point avec des professionnels en micromécanique et microélectronique. Il consiste en un mât télescopique pneumatique de 15 mètres de hauteur sur lequel est fixé un appareil photo numérique manœuvré depuis le sol via un dispositif électromécanique commandé par radio.

Ce matériel est facilement transportable et très simple à utiliser. Celui-ci peut ainsi être mis en œuvre en tous lieux, y compris à l'intérieur de bâtiments (gymnases, salles de spectacles, etc.). L'opérateur dispose d'un écran de contrôle lui permettant de visualiser le cadrage. A l'aide de la radiocommande il peut déplacer l'appareil photo horizontalement et verticalement, utiliser le zoom électrique et appuyer sur le déclencheur. Selon les besoins, une caméra vidéo est également adaptable. Le coût des clichés (à partir de 75 euros TTC) est très réduit par rapport à celui de prises de vues effectuées depuis un avion.

La prestation de service doit intéresser les professionnels de l'immobilier, de l'aménagement et de la communication publique et privée.

► **Pour tout renseignement :**
www.alticlic.fr

■ Le territoire a besoin d'urbanistes qualifiés

La profession d'urbaniste ne connaît pas de définition officielle et n'est donc pas réglementée comme celles, par exemple, des géomètres-experts et des architectes. Pour pallier cette situation et permettre aux donneurs d'ordre et aux maîtres d'ouvrage de repérer les compétences dans le domaine, l'Office professionnel de qualification des urbanistes (OPQU), association Loi 1901, a été créé en 1998 avec le soutien de l'Etat et l'Association des maires de France. Depuis, l'OPQU porte une mission de service public relative à l'attribution de la qualification professionnelle aux urbanistes et à sa reconnaissance.

Sur demande, cette qualification reconnue par l'Union européenne par référence aux critères par la Charte européenne des urbanistes, est attribuée sur délibération d'une commission, en présence d'un commissaire du gouvernement. A l'heure où la crise du logement reste préoccupante et la volonté d'un développement durable clairement affichée l'OPQU est heureux de saluer le 500^e de ses membres, Pascale Outier-Vilain, directeur de l'agence Traverses à Perpignan.



► **Pour tout renseignement :**
www.opqu.org

■ Nouveautés chez Topcon : Topfield et TopSURV7



TopField est un logiciel de recueil de données et d'implantation simple pour les stations totales. Il offre une alternative au logiciel standard embarqué des stations totales Topcon des séries GTS-100N, GTS-230N et GPT-3000N/LN.

Le logiciel TopSURV7 permet de simplifier et d'accélérer le recueil et la livraison des données. Le nouveau moteur de la base de données réduit la taille des fichiers de 60 %.

L'interface utilisateur fonctionne avec des icônes (jamais plus de quatre clics pour réaliser une opération). Le TopSURV 7 est compatible avec les principaux formats de fichiers et permet de créer visuellement des tris et des codes personnalisés afin d'assurer le transfert des données.

Plusieurs modules sont disponibles :

- **Entrepreneur** : fonctionnalité simplifiée pour les tâches de planification et de recueil de point.
- **Route** : création et modification de modèles transversaux, alignements horizontaux et verticaux, piquetage de route et de pente, etc.
- **Robotique** : permet de commander la station robotique Topcon (prise en charge intégrale de l'ensemble des fonctions avancées de toute la gamme robotique). Le balayage de surface automatisé intégrant l'imagerie numérique est inclus. Les images peuvent être placées sur des mesures pour un affichage et une analyse 3D dans Topcon Tools.
- **GPS** : commande et configuration RTK simplifiées et accélérées grâce aux routines de base et de récepteur automatisées. Intégration des données topographiques conventionnelles et GPS.
- **SIG** : intégration de données et capacités sophistiquées pour les professionnels SIG/topographies.

► **Pour tout renseignement :** www.topcon.eu

■ La société GEODATA DIFFUSION investit dans 100 nouvelles stations permanentes pour terminer la couverture métropolitaine de son réseau ORPHEON

Leica Geosystems annonce l'acquisition de 100 stations supplémentaires par la société GEODATA DIFFUSION pour l'extension du réseau de stations permanentes Orphéon.

Avec 160 stations permanentes à terme, le réseau Orphéon couvrira entièrement la France Métropolitaine et se hissera parmi les plus importants réseaux mondiaux, 90 de ces stations seront opérationnelles dès juin 2008, en GPS comme en Glonass.



En 2004, GEODATA DIFFUSION investissait dans 50 stations GNSS Leica pour étendre le réseau Orphéon alors constitué de 10 stations. Leica Geosystems est alors le premier constructeur à proposer la technologie MAC qui implémente le standard MAX (Master Auxiliary Concept) en matière de corrections réseau GNSS. Ce standard a été adopté par la commission internationale RTCM (Radio Technical Commission for Maritime services) en mai 2006. En 2006, GEODATA DIFFUSION choisit l'expertise de Leica Geosystems et son logiciel Leica SpiderNet, qui permet de contrôler la stabilité des stations permanentes, de les maintenir et de diffuser les corrections du réseau.

En investissant dans 100 stations et 140 licences logicielles supplémentaires pour couvrir à court terme l'ensemble du territoire métropolitain avec près de 200 stations opérées, GEODATA DIFFUSION renouvelle sa confiance en Leica Geosystems. En choisissant les stations Leica GRX1200pro compatibles GNSS, GEODATA DIFFUSION devient le premier réseau GNSS à couvrir entièrement la France métropolitaine en GPS comme en Glonass.

► Pour tout renseignement : Marketing.france@leica-geosystems.com

COMITÉ DE LECTURE

BAEHR Hans-Peter, Université de Karlsruhe

BAILLY André, Ingénieur ESTP

BILLEN Roland, Université de Liège

BORDIN Patricia, ENSG

BOTTON Serge, ENSG

BOURGOIN Jean, Ingénieur Général Hydrographe

BRETAR Frédéric, Laboratoire MATIS, IGN

CHRISMAN Nicholas, Université Laval, Québec

DEBARBAT Suzanne, Astronome Observatoire de Paris

DISSARD Olivier, ENSG

D'HOLLANDER Raymond, Ingénieur Général Géographe, IGN

DONNAY Jean-Paul, Université de Liège

DRAP Pierre, Chargé de recherches CNRS

DUQUENNE Henri, IGN

DUQUENNE Françoise, IGN

DURAND Stéphane, ESGT

Gilbert FERHAT, INSA de Strasbourg

GRUSSENMEYER Pierre, INSA de Strasbourg

HENO Raphaële, ENSG

HOMBROUCK Laurent, Ingénieur ENSAIS, Grenoble

KASSER Michel, Directeur ENSG, IGN

KOEHL Mathieu, INSA de Strasbourg

LANDES Tania, INSA de Strasbourg

MAILLARD Jean-Pierre, Urbaniste, Géomètre-Expert Foncier

MAYOUD Michel, Ingénieur ESGT

MERMINOD Bertrand, Professeur EPFL, Lausanne

MOREL Laurent, ESGT

NATCHITZ Emmanuel, ESTP

NICOLAS Joëlle, ESGT

PANTAZIS N. Dimos, Technological Education Institution (TEI), Athènes

POLIDORI Laurent, Directeur de l'ESGT

RAVEZ Bertrand, Bouygues TP

REIS Olivier, Ingénieur ENSAIS

RIFFAULT Jacques, Directeur Commercial

ROCHE Stéphane, Université Laval, Québec

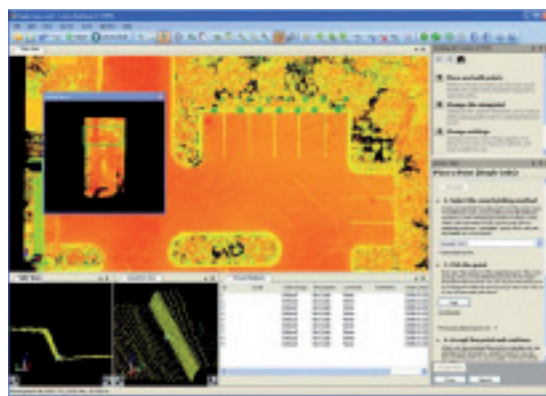
RUAS Anne, Chef du Cogit, IGN

VINCENT Robert, Ingénieur ECP

WILLIS Pascal, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées

■ Nouveautés chez Leica Geosystems

La société Leica Geosystems annonce la mise sur le marché du logiciel Cyclone II TOPO, permettant la création rapide de plans topographiques à partir de données de nuages de points issus du scanner laser. Ce logiciel, qui dispose d'une interface dédiée au métier de la topographie, utilise des techniques de conception assistée par ordinateur (CAO) et ne nécessite pas de compétences spécifiques en matière de scanner laser.



Leica Geosystems annonce également la mise sur le marché de sa nouvelle génération d'antennes choke ring AR25, couvrant l'ensemble des constellations GNSS (GPS, Glonass, Galileo et Compass/Beidou2) ainsi que les signaux de la bande L (SBAS, CDGPS et OmniStar). Ces antennes sont équipées d'un nouveau cône 3D qui améliore leurs performances dans des conditions difficiles de réception (multitrajets, faibles rapports signal/bruit, satellites bas sur l'horizon) et sont destinées en priorité aux gestionnaires de stations permanentes ou de réseaux de stations permanentes GNSS.

► Pour tout renseignement : www.leica-geosystems.fr

■ Mini-centrales pour mini-drones

Depuis quelques années, de nombreuses manifestations assorties d'un concours sont organisées en Europe et aux Etats-Unis sur les drones miniatures. Organisé par l'ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales) et subventionné par la DGA (Délégation Générale pour l'Armement), le Challenge Minidrones s'inscrit dans cette tendance. Il définit un drone miniature comme un engin volant dont la plus grande dimension n'excède pas 70 cm, emportant un ou plusieurs capteurs, et capable d'évoluer hors de la vue directe du pilote. Les centrales inertielles Xsens sont souvent utilisées pour fusionner les données collectées par les drones. 7 des 12 équipes sélectionnées pour participer à l'édition 2007-2009 de ce Challenge ont fait le choix d'utiliser ces systèmes miniaturisés.

► Pour tout renseignement : www.cadden.fr/documentation/MTI-G.pdf et www.minidrones.fr

Agenda des manifestations

■ Du 14 au 19 juin 2008 :
XXXI^e assemblée générale de la FIG à Stockholm
www.fig.net/events/2008/fig_2008

■ Du 3 au 11 juillet 2008 :
XXI^e congrès de l'ISPRS
à Pékin - www.isprs2008-beijing.org

■ Du 17 au 19 septembre 2008 :
Journées de la Topographie de l'INSA de Strasbourg et Congrès National de l'Ordre des géomètres-experts à Strasbourg
www.insa-strasbourg.fr
www.geometre-expert.fr

■ Du 30 septembre au 2 octobre :
Intergeo - Brême (Allemagne)
www.intergeo.de

■ Les 1^{er} et 2 octobre :
12^e Conférence Francophone ESRI - SIG 2008
Palais des Congrès de Versailles
www.esrifrance.fr/sig2008
sig2008@esrifrance.fr

■ Du 2 au 5 octobre 2008
Festival international de géographie (FIG) de Saint-Dié-des-Vosges
www.fig-saintdie.com

PETITE ANNONCE

Je cesse mon activité de B.E Topo, je vends une station robotisée SOKKIA série SXR, modèle récent. Prix : me contacter.

Je me sépare aussi de mon traceur CANON IPF 700 modèle 2007 pour 3 500 €.

Tél. : 06 70 61 33 31
ou ecmdb@orange.fr

OFFRE D'EMPLOI

La ville de Cannes (Alpes-Maritimes) recrute un ingénieur géomètre topographe à la Direction des Systèmes d'Information et des Télécommunications/Service Information Géographique.

Le service Information Géographique, prestataire interne au service de l'ensemble de l'administration cannoise, exerce essentiellement 4 missions :

- l'administration et la gestion des outils géomatiques (Système d'Information Géographique, maquette 3D),
- la réalisation des levés topographiques et leur capitalisation dans une base de données topographiques (projet à lancer),
 - l'implantation, le contrôle, la numérisation des alignements,
 - l'assistance technique au contrôle des permis de construire.

Sous l'autorité du Chef du service, l'Ingénieur géomètre topographe anime et conduit les projets topographiques, gère la base de données topographiques, participe à des travaux topographiques, administre la station GPS permanente, assure une partie de la veille juridique et technique dans le domaine de la topographie.

De formation supérieure, Ingénieur géomètre topographe ou cadre expérimenté de la spécialité, vous maîtrisez parfaitement les outils de l'informatique liés au SIG, au GPS et à la CAO/DAO (Autocad Map, Covadis), la connaissance du logiciel APIC est un plus. Vous possédez d'excellentes connaissances juridiques du domaine appliquées aux collectivités locales. Le poste nécessite rigueur et disponibilité.

Merci d'adresser votre candidature (lettre manuscrite et CV), à :
M. le Député Maire, DRH, Hôtel de Ville, BP 140, 06406 Cannes Cedex.
Courriel : drh@ville-cannes.fr

■ Le projet eXpert : pour et par les professionnels du bâtiment



En réponse à l'appel du Ministère de l'Economie des Finances et de l'Emploi, les principaux représentants de la filière du bâtiment ont lancé le projet eXpert qui vise à soutenir et accompagner les progrès liés aux nouvelles pratiques nées de l'informatique. Unaniment, les organisations de la branche dont l'Ordre des géomètres-experts considèrent que l'harmonisation et le développement de l'usage des technologies d'aujourd'hui par les professionnels constituent un axe majeur de qualité et de productivité au profit de tous.

Les partenaires entendent progresser vers une ingénierie basée sur le format de données standard mondial (IFC), issu des travaux de l'*International Alliance for Interoperability*, et perçu comme seul gage de fluidité de l'information technique.

Cela passe par la définition et la mise en œuvre d'une évolution technologique dite de la maquette numérique (*building information model* ou BIM – pour les anglo-saxons) comme base de données unique du Bâtiment, à partager par l'ensemble des acteurs tout au long des phases de conception, d'étude, de géolocalisation, de construction puis d'exploitation. Cette maquette intégrant la 3D permettra l'interopérabilité des logiciels supprimant ainsi nombre de ressaisies autrement dit de pertes de données et de difficultés informatiques. L'ensemble du projet s'appuie sur huit groupes de travail dont les conclusions sont attendues pour mi-2009. Il concerne d'abord la maquette numérique mais aussi, dans une approche horizontale de la filière, l'amélioration de la collaboration sur les chantiers.

La réussite du projet nécessite l'implication de tous.

► Pour tous renseignements :
www.projet-expert.fr - www.buildsmart.fr

LA VIE ASSOCIATIVE

L'AFT prend acte de la fin du mandat de quatre membres de son conseil en mesurant la part significative du service rendu et en exprimant sa reconnaissance. Avec leur départ, c'est une page qui se tourne tant ils n'ont pas ménagé leur temps pour l'AFT dans des fonctions dirigeante et d'administration.

Michel Mayoud, au cœur de l'activité de métrologie du CERN, et toujours aux frontières du possible, a brillamment et durablement représenté l'AFT à la FIG, dont il a même présidé la Commission 6. Précédemment il s'est beaucoup investi dans les relations entre l'AFT et l'OGÉ. Il s'est par ailleurs impliqué dans de nombreuses manifestations, de l'AFT mais aussi de la FIG aux noms desquels il a été co-organisateur du grand Congrès de Paris 2003.

Pendant de nombreuses années, **Robert Chevalier**, spécialiste autour du monde des lignes électriques a été responsable polyvalent d'XYZ. En même temps rédacteur en chef et chargé de la publicité il a confectionné et fait vivre la revue qui, grâce à sa constante détermination pourra d'ici peu fêter ses trente ans.

François Le Thierry d'Ennequin, fort de sa carrière d'ingénieur chez Total est aussi un fidèle de l'association. Depuis longtemps, un jour par semaine il assure une présence bénévole au service des comptes et du fonctionnement matériel du bureau spécialement chargé de l'informatique et de la relation avec l'IGN, propriétaire des locaux.

Enfin **Jean Bourgoïn** ingénieur général hydrographe, ancien directeur du SHOM a, de longue date, mis sa notoriété au crédit de l'association en organisant des manifestations et en contribuant par ses articles au rédactionnel d'XYZ. Le conseil du 12 mars 2008 l'a élevé au titre de président honoraire.

Le 12 juin 2008, l'assemblée générale élit leurs successeurs, les statuts prévoyant le renouvellement par tiers des dix-huit membres du conseil. Les nouveaux membres, n'en doutons pas, sauront reprendre le flambeau transmis par leurs aînés.

NOMINATION



Le 5 mars 2008, le conseil des ministres a nommé **Patrice Parisé**, ingénieur général des ponts et chaussées, au poste de directeur général de l'Institut Géographique National.

Patrice Parisé commence sa carrière en 1973 à la DDE de Seine-et-Marne puis durant les années 1980 et 1981 a rejoint le cabinet du ministre des transports, successivement Joël Le Theule et Daniel Hoeffel. En 1982 il est nommé chef du bureau des exportations à la direction des affaires économiques et internationales du ministère de l'équipement. Après un passage express en 1985 à l'établissement public d'aménagement de la ville nouvelle de Sénart en qualité de directeur général adjoint, chargé de l'aménagement et des travaux, il entre en 1986 pour sept ans à la Société auxiliaire d'entreprise (SAE) dans l'équipe de direction. En 1993 il reprend des fonctions ministérielles comme conseiller auprès de Daniel Hoeffel, alors devenu ministre délégué à l'Aménagement du territoire et aux Collectivités locales, jusqu'à devenir en 1995 le directeur adjoint du cabinet de Jean-Claude Gaudin le nouveau ministre de l'Aménagement du territoire, de la Ville et de l'Intégration.

En 1997 il intègre l'administration centrale à la direction des routes au ministère de l'équipement, des transports et du logement en tant qu'adjoint au directeur. Après un passage à la direction générale de l'aviation civile entre 2001 et 2003 – il est le directeur des programmes aéronautiques civils (DPAC) –, il retourne à la direction des routes du ministère jusqu'à en être le directeur général. Dans le cadre de cette fonction, il a été président de la Caisse nationale des autoroutes, vice-président de l'établissement public Autoroutes de France et membre du conseil scientifique du Laboratoire central des ponts et chaussées.

L'AFY et XYZ félicitent Patrice Parisé pour sa nomination.

► Pour plus d'informations : www.ign.fr

DISTINCTIONS

■ L'Ordre des géomètres-experts à l'honneur

Deux de ses membres les plus dévoués, **Alain Gaudet**, président d'honneur du Conseil supérieur et **Guy Bléard**, président d'honneur du Conseil régional de Nord-Picardie ont respectivement reçu des mains de Bernard Accoyer, président de l'Assemblée nationale les insignes de chevalier de la légion d'honneur et de l'ordre national du Mérite.

La manifestation s'est déroulée le 9 avril 2008 au siège de l'avenue Hoche à Paris en présence de nombreux invités. Ces distinctions marquent la reconnaissance de l'action des deux récipiendaires et du travail accompli au service des instances de la profession, chacun dans ses responsabilités.

Pour Guy Bléard, cette action se poursuit aujourd'hui en prenant la succession

De gauche à droite : Alain Gaudet, Guy Bléard et Bernard Accoyer

de Jean-Pierre Picavet à la tête de la société Publi-Topex chargé de l'édition de la documentation professionnelle des géomètres-experts, en premier la publication de la revue Géomètre, des événements de la profession (congrès, universités...), du site Internet et depuis peu de la formation professionnelle.

L'AFT et XYZ adressent leurs félicitations aux nouveaux décorés et salue le riche parcours de Jean-Pierre Picavet au sein des instances dirigeantes de l'Ordre des géomètres-experts.



© Revue Géomètre

L'INSA en Suède : technique et culture

Compte rendu du voyage technique à Stockholm des étudiants de 4^e année de l'INSA de Strasbourg du 16 au 22 mars 2008

"Notre avion va se poser sur l'aéroport de Skavsta. Il est 17h30 et la température au sol est de -3°C". Une fois passé sous la mer de nuages, l'avion continue sa tranquille descente vers le territoire suédois. Parti deux heures plus tôt de Baden-Baden en Allemagne, l'ensemble de la classe de 4^e année de topographie à l'INSA de Strasbourg s'apprête à découvrir le pays qui accueille son voyage technique. Par le hublot, l'œil topographe ne peut s'empêcher de repérer les détails de ce sol grandissant. De longues routes droites partagent l'étendue blanche en grands rectangles aux coins desquels fument les cheminées des exploitations agricoles. L'atterrissage sur le sol givré se passe sans encombre, et nous quittons le tarmac sous une tempête de neige lourde. Les 20 centimètres de neige fraîche retardent notre bus qui met plus de deux heures à parcourir les 100 kilomètres qui nous séparent de la capitale. Enfin, nous arrivons à Stockholm.

Depuis de longs mois, la classe s'est mobilisée pour organiser, prévoir, réserver ce qui promet d'être une belle aventure. Afin de résoudre la sempiternelle question du financement d'un tel projet, la classe a réalisé depuis plus d'un an des travaux pour la Communauté Urbaine de Strasbourg. Cet effort qui a fait s'investir à tour de rôle chacun des élèves de la classe nous a permis de payer l'ensemble des frais de transport et d'hébergement, rendant ainsi accessible à tous ce séjour. Libérés du joug financier, il ne nous restait plus qu'à choisir des visites techniques en lien avec la topographie.

La première visite se déroule le lendemain de notre arrivée. TRIMBLE nous a ouvert les portes d'un de ses ateliers de fabrication et de développement des stations tachéométriques, à Danderyd. Même si, bien évidemment, les appareils photos sont interdits lors de la visite des ateliers, nous en gardons un souvenir fort. Des dizaines d'appareils dernière génération, des procédures huilées et des robots de pointe ont démontré le haut niveau des technologies fabriquées. Mais pour tous, le souvenir le plus marquant est sans conteste de voir un technicien sortir d'un frigo à -20°C, y prendre un appareil, et y rentrer de nouveau pour effectuer toute une batterie de tests ; les mêmes tests qu'il effectuait l'après-midi, habillé cette fois du simple vêtement d'Adam dans une étuve à +50°C. La certification de fabrication nordique passe aussi par là... Le reste de la journée est consacré à différents exposés relatifs aux technologies propres à la firme et son historique.

La seconde visite est elle rendue possible par la présence d'un ancien de l'école au sein de ERICSSON, M. Gillet. Après une matinée consacrée à une présentation générale de l'his-



torique, et de l'offre des produits et services de Sony Ericsson, nous avons la chance de bénéficier d'un long échange avec M. Gillet. Actuellement salarié dans une filiale d'Ericsson, TEMS, comme responsable du développement d'outils de simulation et de gestion des réseaux téléphoniques, il utilise ses connaissances topographiques au service du milieu de la télécommunication. Mais au-delà de son parcours professionnel, nous abordons avec lui les impressions sur la vie en Suède, l'approche du travail dans le pays, et les vastes opportunités qui peuvent s'ouvrir aux ingénieurs topographes de l'actuel INSA et de l'ancienne ENSAIS.

Forts de nos découvertes techniques, en fin de semaine, nous en faisons d'autres culturelles, touristiques et gastronomiques. La visite du SKANSEN, ce gigantesque musée à ciel ouvert de 300 000 m² nous permet de comprendre bien des choses sur la vie traditionnelle scandinave, sur la faune, la flore, l'habitat, ou encore l'artisanat. La qualité de ce musée en fait un véritable pays miniature où les habitants et artisans sont bien plus que de simples figurants et où tout respire l'authenticité. Puis nous visitons le musée Vasa, qui abrite le seul vaisseau du XVII^e siècle à avoir été conservé. A peine sorti de l'arsenal, le bateau a coulé dans le port de Stockholm ! Il n'en est ressorti que 333 ans plus tard. Quatre-vingt quinze pour cent des pièces furent retrouvées et un gigantesque travail de restauration permit l'ouverture du musée au début des années 80. L'ambition de l'architecte avait dépassé les limites physiques et entraîné la perte de ce qui devait être le fleuron de la marine royale suédoise.

Que retiendrons-nous de ce voyage en Suède ? La permanente évolution des techniques de notre métier, la diversité des possibilités d'application de nos connaissances, la beauté de ce pays et la richesse de son histoire. Nous retiendrons aussi la réalisation d'un projet de classe, qui restera pour chacun des membres de ce groupe un sacré souvenir. Un grand merci à nos contacts sur place, à l'INSA, et à nos professeurs accompagnateurs MM. Graff et Ledig sans qui ce voyage n'aurait pu se réaliser. ●

4^e Forum de la TOPOGRAPHIE

Comme le précédent, l'éditorial (p. 5) commente largement le 4^e Forum de l'AFT, et sa préparation au travers du n° 114 d'XYZ "Spécial SIG 3D". Cela souligne à nouveau l'intérêt pour le sujet et la manifestation.

Ce dossier "Spécial SIG 3D" comporte des articles qui rendent redondant le compte rendu des conférences de Mathieu Koehl sur la 3^e dimension émergente et Patrick Leboeuf sur les perspectives 3D du Géoportail. Pour sa part le troisième intervenant, Franck Perdrizet, réserve à un prochain numéro d'XYZ la formulation écrite de la présentation du projet SIGMA mis en œuvre dans l'agglomération montpelliéraine et les réalisations tangibles des collectivités territoriales correspondantes.

En revanche, le dossier SIG est complété par des contributions de Laurent Niggeler qui fait connaître une pratique suisse et celle d'Yves Riallant qui replace l'information géographique à un niveau planétaire. Pour leur part, plusieurs exposants ont souhaité prolonger leur participation à l'exposition associée au Forum et XYZ leur ouvre volontiers ses colonnes. Enfin, le lec-



Remise des prix AFT 2007 : de gauche à droite Pierre Grussenmeyer, Michel Kasser, Alexander Hoffmann-Blodau, Antoine Billault, Jean-Marie Bonnaz et Céline Piacentile.

teur trouvera l'article de Céline Piacentile, lauréate du 2^e prix de l'AFT 2007.

A ce sujet, la remise des prix AFT 2007 a été également un grand moment de la journée du 27 mars 2008 à Cachan. Forte du parrainage de la société TOPCON, l'AFT a pu largement et respectivement récompenser :

- Premier prix 600 € : Jean-Marie Bonnaz (ESGT) pour "Evaluation du module d'erreur de capteur MEMS-IMU"

- Deuxième Prix 500 € : Céline Piacentile (INSA) pour "Réalisation de représentations bi- et tridimensionnelles interactives pour un système d'information archéologique"

- Troisième Prix 400 € : Antoine Billault (INSA) pour "Positionnement de puits déviés"

Rappelons que l'AFT invite chaque année les nouveaux diplômés à soumettre au comité de rédaction d'XYZ un article portant sur votre travail de fin d'études d'ingénieur géomètre-topographe. Les meilleurs articles sont, comme on le voit, récompensés puis publiés dans la revue au fil des numéros. Pour plus de renseignements, les étudiants intéressés peuvent se reporter au site Internet de l'association : www.aftopo.org.

Cette année, l'actualité ne permet pas de respecter l'ordre du résultat, ce que le gagnant du premier prix comprendra aisément. Le travail des autres concurrents a été remarqué, et un résumé de leurs travaux clôturera la publication.



Au deuxième étage : l'exposition.

Réalisation de représentations bi- et tridimensionnelles interactives pour un Système d'Information Archéologique

■ Céline PIACENTILE

MOTS-CLÉS

Patrimoine archéologique, plans 2D et modèles 3D interactifs, SVG, VRML

L'archéologie est une science d'aujourd'hui et, à ce titre, elle utilise des outils infographiques récents, notamment en matière de restitutions 2D et 3D. Il paraît essentiel de voir dans quelle mesure cette pratique peut servir

l'archéologie, et ce aussi bien au niveau du travail des archéologues, que sur la façon dont elles permettent l'accessibilité des données à un large public.

L'approche développée ici propose plusieurs méthodes simples d'utilisation pour la réalisation de plans 2D et de modèles 3D interactifs visibles sur le Web, destinées aux professionnels du patrimoine archéologique. A partir de dessins bi- et tridimensionnels dans AutoCAD, l'objectif est de transformer ces représentations en plans SVG et/ou en modèles VRML interactifs de manière automatisée.

La finalité résidera dans le fait de pouvoir repérer un lieu d'intérêt, cliquer sur cet élément et obtenir ainsi simultanément les informations le concernant stockées dans une base de données.

Ce projet réalisé au sein du laboratoire MAP-PAGE s'inscrit dans la continuité d'une thèse de doctorat débutée en 2004 par Elise Meyer intitulée : "Acquisition 3D, documentation et restitution en archéologie : proposition d'un modèle de Système d'Information dédié au patrimoine". La finalité de cette thèse est la création d'un Système d'Information fonctionnant sur le Web, permettant aux archéologues de gérer les quantités de données qu'ils produisent et de pouvoir les représenter.

Un premier site d'expérimentation, le château médiéval de Vianden au Luxembourg, a permis d'implémenter le système. Des plans interactifs ont été créés et les modèles 3D existants sur le château ont été optimisés et interfacés.

Il s'agit désormais de tester les outils développés (intégration de nouvelles données) et d'automatiser les processus de création et d'interfaçage des données à intégrer dans le Système d'Information Archéologique réalisé.

Cet article se décompose en quatre parties : après avoir brièvement énoncé le contexte et les objectifs de notre étude, nous citerons les différentes étapes du processus d'automatisation, et les informations nécessaires à leur compréhension seront relatées.

Puis, nous présenterons les expérimentations concernant la mise en place du processus d'automatisation, en explicitant les différentes démarches effectuées pour mener à bien le projet. Nous concluons finalement sur l'apport de nos travaux, les améliorations possibles et les perspectives envisageables.

Contexte et objectifs

Au cours des années 1975 et 1976, le Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg entreprit des fouilles sur le site de la villa gallo-romaine d'Echternach. Celles-ci fournirent quantités d'informations qui furent ensuite analysées et rassemblées en 1981 dans l'ouvrage de référence traitant de ce site : "Ausgrabungen in Echternach" (Metzler et al. [1981]). Puis le site archéologique fut au fil des années quelque peu délaissé.

Dans le cadre de l'aménagement du pôle touristique environnant, il fut décidé la construction d'un musée aux abords même des vestiges. L'idée centrale de ce musée est de présenter aux visiteurs une approche de la vie quotidienne dans ce palais-villa à la fin du premier siècle après J.-C., à travers des maquettes, des ambiances, des objets-témoins, des présentations des différentes pièces d'habitation et occupations qui s'y déroulaient.

Le Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg a confié au MAP-CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, École d'Architecture de Nancy) la réalisation de tous les documents numériques devant être présentés au public, que ce soit dans le musée ou sur des panneaux *in situ*, permettant aux visiteurs de faire un rapport

► immédiat entre ce qui subsiste et les hypothèses de reconstitution. Des images de synthèse ont été réalisées à partir de plans 2D et de modèles 3D générés sur AutoCAD et 3D Studio.

La problématique de notre projet porte précisément sur la transformation des plans 2D et des modèles 3D réalisés par le MAP-CRAI en interfaces permettant l'accès aux informations d'une base de données sur Internet. Nous pouvons distinguer deux objectifs principaux :

- le premier est d'étudier les possibilités d'exploitation de dessins 2D ou 3D au format .dwg pour leur utilisation comme interfaces d'accès à des données sur le Web, ce qui implique une transformation des plans en SVG et des modèles en VRML ;
- le second est d'étudier les possibilités d'automatisation des ancrages, tâche fastidieuse à réaliser manuellement pour toutes les représentations. La finalité de l'ancrage réside dans le fait de pouvoir repérer un élément du plan 2D ou du modèle 3D, cliquer sur cet élément et obtenir simultanément le plan 2D ou modèle 3D et les informations le concernant stockées dans une base de données.

Outils utilisés pour les développements

Le processus d'automatisation de création des plans et des modèles interactifs est composé de deux étapes successives :

1. l'identification et la discrétisation du plan ou modèle selon des lieux et des sous-lieux
2. le processus d'ancrage

Tout d'abord, il convient d'explicitier cette notion de "lieu" et de "sous-lieu".

Un site archéologique est constitué d'un ensemble de lieux et l'enjeu a été de repérer les lieux ayant joué un rôle de pôle. Puis, il a été défini des hiérarchies locales entre lieux et sous-lieux à partir, d'une part, des connaissances préalables accumulées sur le fonctionnement des sociétés antiques et, d'autre part, de l'analyse des données archéologiques recueillies au cours des fouilles. Un sous-lieu est une partie significative d'un lieu, dépendant de celui-ci, ayant une fonction propre et parfois en complémentarité avec les autres sous-lieux du même lieu.

Nous souhaitons donc avoir la possibilité de repérer les différents lieux et sous-lieux du site, et d'accéder aux informations textuelles ou iconographiques les concernant, stockées dans une base de données. Nous avons appelé ce processus l'ancrage.

Afin de répondre aux besoins d'interopérabilité et de portabilité de l'application, le choix d'utiliser des solutions *open source* s'est rapidement avéré pertinent (pour des raisons économiques et pratiques). Il s'agissait aussi d'un moyen d'évaluer le potentiel des outils libres, dans le contexte de la montée en puissance de l'*open source* dans le domaine de la géomatique, et dans les technologies informatiques en général. Nous avons utilisé le pack WAMP 5 (Windows, Apache, MySQL, PHP), plate-forme de développement Web

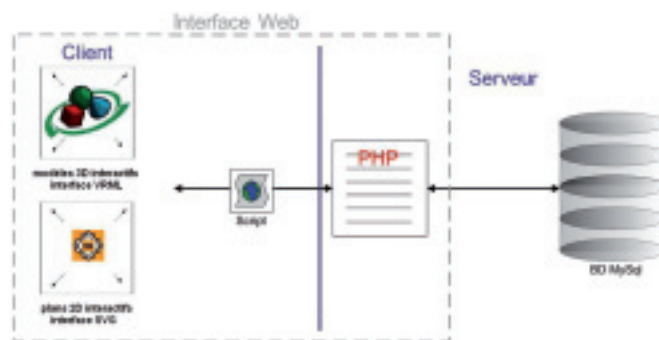


Figure 1. Fonctionnement informatique du Système d'Information (Meyer et al. [2006] modifié).

sous Windows permettant de développer des sites Web dynamiques à l'aide du serveur Apache2, du langage de script PHP5 et d'une base de données MySQL version 5.

Le Système d'Information se base sur un serveur PHP. Nos plans 2D et nos modèles 3D sont donc rendus interactifs par l'intermédiaire d'un processus d'ancrage faisant appel à des scripts PHP (en liaison avec des bases de données MySQL), implémentant des Javascripts lors de la reconstruction du fichier SVG, et des VRMLScripts et des Javascripts lors de la reconstruction du fichier VRML. La Figure 1 illustre le fonctionnement informatique du système.

La dernière étape à réaliser est une liaison bidirectionnelle entre les informations concernant les lieux et les sous-lieux, et les plans ou modèles.

Une fois les plans et les modèles ancrés et dotés d'une fonction de repérage, nous souhaitons avoir la faculté de choisir, au moyen d'une liste, les plans ou modèles que nous voulons afficher, et obtenir ainsi un accès "aller-retour" du plan ou du modèle aux données textuelles ou iconographiques.

La Figure 2 explicite les différents liens "aller-retour" possibles entre les données de différents types.

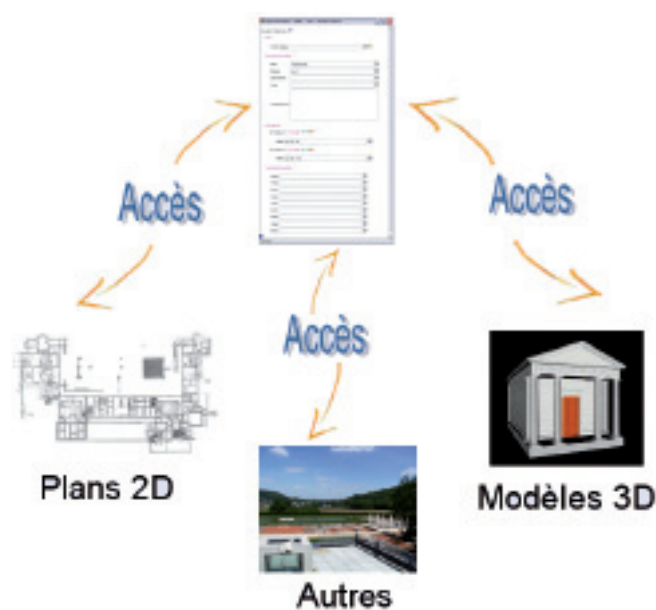


Figure 2. Liens "aller-retour" permettant d'accéder aux diverses données.

Processus d'automatisation de créations de plans et de modèles interactifs

Sachant qu'AutoCAD est le logiciel utilisé par une majorité de professionnels en CAO/DAO et d'archéologues (Eiteljorg II et al. [2002]), nous avons considéré les fichiers .dwg comme données de départ.

L'objectif du projet est d'étudier les possibilités d'exploitation de dessins 2D et 3D au format .dwg pour leur utilisation comme interfaces d'accès à des données sur le Web, ce qui implique une transformation des plans en SVG (*Scalable Vector Graphics*) et des modèles en VRML (*Virtual Reality Modeling Language*).

Le SVG (*Scalable Vector Graphics*) est un langage de description de graphiques en deux dimensions, basé sur le langage XML (*eXtensible Markup Language*). SVG est normalisé par le W3C (*World Wide Web Consortium*), et contrairement au format vectoriel Flash, il s'agit d'un outil *open source*.

En anglais, et pour le monde des images, "*Scalable*" signifie qu'il n'y a pas de contraintes de dimensionnement. Les proportions du dessin sont toujours respectées et la mise à l'échelle se fait sans perte de qualité.

Le langage SVG est intéressant dans la mesure où, par l'intermédiaire de scripts écrits en Javascript par exemple, il permet la création d'animations et/ou d'événements interactifs (*onmouseover*, *onmouseout*, *onclick*, *onfocus*).

La norme VRML 1.0 (*Virtual Reality Modeling Language*), élaborée en 1994, est un format de fichier, qui, associé à un *plugin* (logiciel traduisant le fichier VRML en une représentation 3D et calculant les images de la scène vues par l'utilisateur), permet de décrire un monde tridimensionnel fixe et de le visualiser interactivement sur Internet.

Trois ans plus tard, une nouvelle version plus puissante (VRML 97 devenu VRML 2.0), autorisant de nombreuses fonctionnalités en sus, telle que la possibilité d'animation, est devenue le standard le plus communément adopté (dans le milieu universitaire notamment).

Aujourd'hui, le développement s'effectue sous l'égide du W3C alors que le langage évolue sous l'appellation X3D (*eXtensible 3D*). La structure du X3D est calquée sur celle du VRML et de nombreux éléments de syntaxe ont été conservés. Ainsi, passer d'un langage à son successeur est assez aisé (rajout de balises). Cependant, Elise Meyer [2007] a décidé de garder le VRML comme format de description des scènes 3D pour plusieurs raisons :

- peu de logiciels de modélisation exportent en X3D actuellement mis à part Blender, logiciel gratuit mais difficile d'utilisation ;
- VRML est un langage plus communément employé ;
- pour l'affichage des scènes décrites au format X3D, il existe peu de navigateurs standardisés tels que Cortona ou CosmoPlayer (il en existe un sous-environnement Linux appelé FreeWRL).

Ainsi, tous les modèles 3D seront décrits avec le langage VRML 2.0.

Or AutoCAD ne génère directement ni des fichiers au format SVG (extension .svg), ni des fichiers au format VRML (exten-

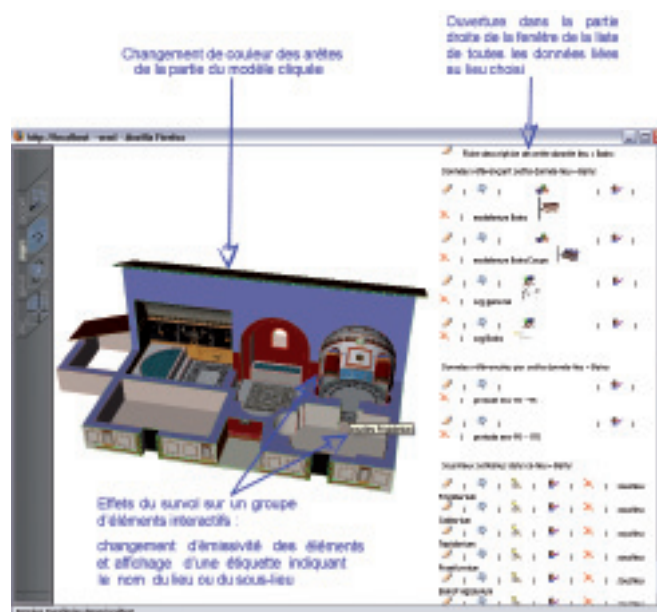


Figure 3. Interface 3D interactive pour l'accès aux données liées aux lieux modélisés.

sion .wrl). Il faut donc passer par un format intermédiaire, puis utiliser un utilitaire pour convertir les fichiers obtenus au format voulu. Nos choix se sont portés sur le logiciel "Adobe Illustrator", logiciel commercial de référence de création graphique vectorielle pour les plans 2D et sur le logiciel de modélisation 3D "Sketchup" pour les modèles par soucis d'accessibilité et de coûts.

A partir de notices que nous avons écrites, l'utilisateur est guidé lors de la production des plans et des modèles afin que ceux-ci soient compatibles avec les programmes réalisés. Puis, une fois ces fichiers obtenus sur "Adobe Illustrator" pour les plans et "Sketchup" pour les modèles et exportés aux formats respectifs .svg et .wrl, il utilise l'outil de création de représentations 2D ou 3D interactives, insère ses fichiers et le processus d'ancrage se fait automatiquement.

L'apport de notre étude réside aussi dans l'amélioration du processus d'ancrage conçu par Elise Meyer [2007] qui avait utilisé un changement de couleur de faces dans le premier site d'expérimentation ayant servi à implémenter le système. Lorsque l'utilisateur passe sur le lieu, ses faces changent de couleur spéculaire (définissant la couleur des rayons lumineux réfléchis sur la surface de l'objet) et lorsqu'il clique dessus pour obtenir les informations le concernant, c'est la couleur générale de l'objet qui change.

Cependant, bien que fonctionnel, ce moyen de repérage a pour défaut l'impossibilité de texturer le modèle, ce qui représente une perte d'informations au niveau des propriétés de surface de l'objet.

Les options d'export sont différentes selon les logiciels et il semble que pour le site de Vianden, dont les modèles 3D avaient été obtenus sur le logiciel Maya, il n'était pas possible d'utiliser les arêtes comme objets de représentation. C'est une possibilité d'export qu'offre "Sketchup" et que nous avons utilisée afin d'avoir la capacité de texturer l'objet (cf. Figure 3).

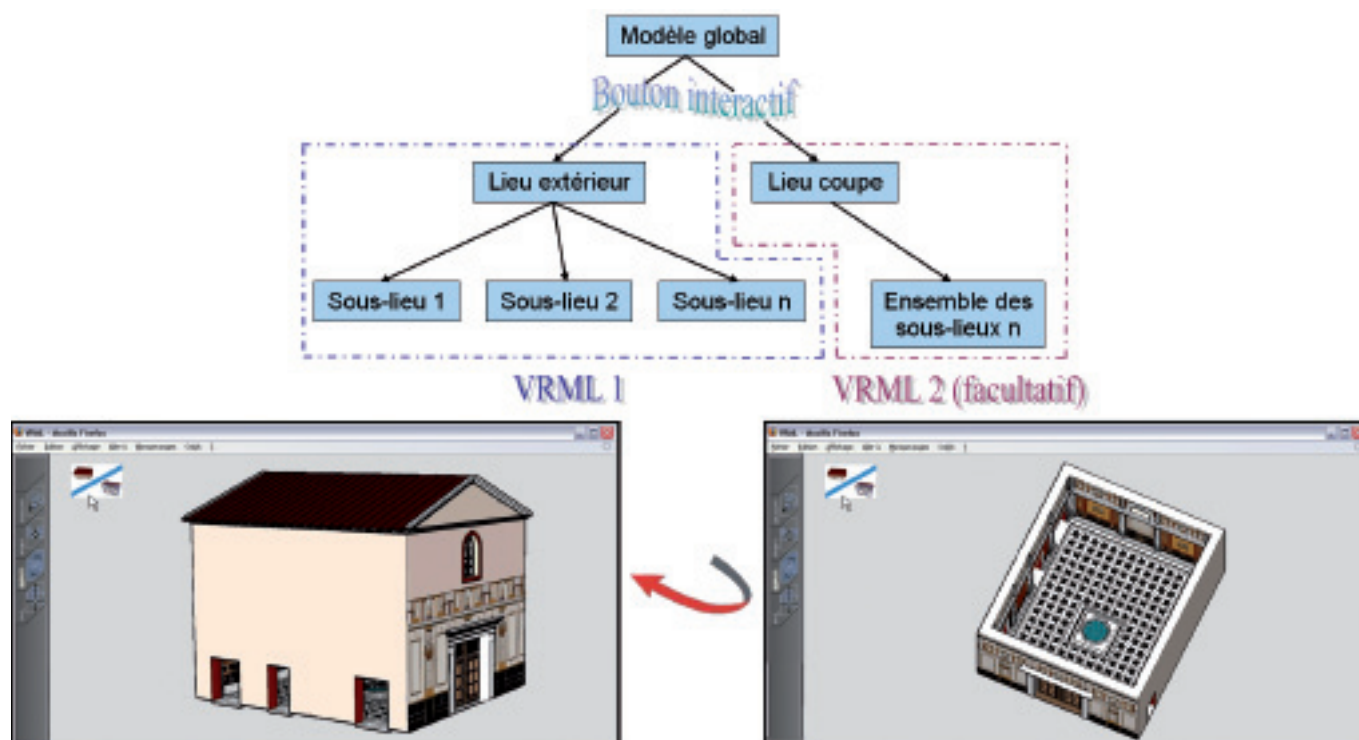


Figure 4. Structure hiérarchique du VRML final : passage du lieu à sa coupe par l'intermédiaire d'un bouton HUD constamment accessible à l'utilisateur.

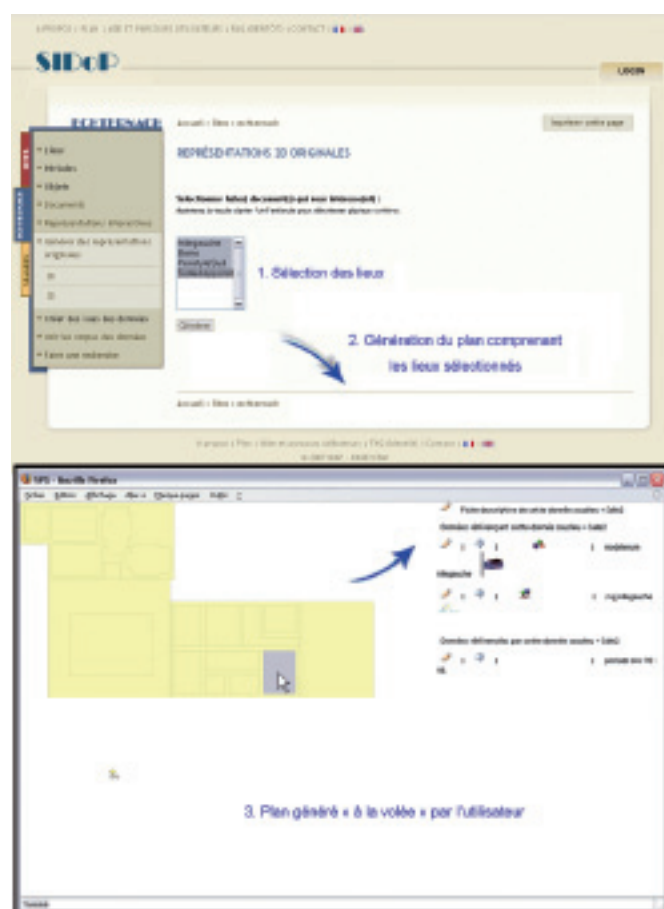


Figure 5. Plan "à la volée" issu des quatre plans interactifs des lieux créés.

Possédant des images de synthèse de certaines coupes des bâtiments, nous avons par la suite automatisé un processus permettant à partir des modèles 3D d'un lieu et de sa coupe, de passer d'un modèle à l'autre par l'intermédiaire d'un bouton constamment en interface avec l'utilisateur, appelé HUD (*Heads Up Display*) tel que l'illustre la Figure 4.

Enfin, nous avons créé des formulaires PHP permettant à l'utilisateur de choisir parmi les plans et les modèles interactifs des lieux générés, ceux qu'il souhaite visualiser simultanément (cf. Figure 5).

Conclusions et perspectives

La sauvegarde du patrimoine est une des préoccupations majeures des architectes, archéologues et conservateurs. Dans ce cadre, l'utilisation d'outils informatiques est primordiale. Ils offrent de nouvelles possibilités dans le traitement des données toujours plus nombreuses que les gestionnaires de sites sont amenés à manipuler après les avoir recueillies sur le terrain. Le gain de temps apporté par l'automatisation de certains procédés, ainsi que la facilité d'utilisation de ces programmes sont des apports considérables.

L'utilisation d'Internet dans la perspective de diffuser des informations, et les divers travaux de programmation menés ont orienté la réflexion sur la situation des Systèmes d'Informations dans le contexte de montée en puissance des technologies *open source*, ainsi que sur le potentiel du Web vis-à-vis de la diffusion et du partage des données.



L'environnement Internet offre, en effet, actuellement des outils de développement avancés permettant d'allier souplesse, interactivité, performance et universalité.

Nous avons inséré dans le Système d'Information des programmes PHP permettant l'obtention de plans 2D et de modèles 3D interactifs par l'intermédiaire d'un processus d'ancrage automatique. Ce processus permet le repérage des lieux et sous-lieux du site, ainsi que l'accès à leurs données descriptives. L'archéologue pourra, au moyen de notices que nous avons rédigées, représenter rapidement et aisément de manière interactive les plans 2D et modèles 3D du site qu'il gère.

Enfin, des interactions bidirectionnelles entre les données textuelles et bi- et tridimensionnelles font de ces représentations du site des interfaces privilégiées d'interrogation.

Cependant, à l'heure actuelle, le Système d'Information réalisé n'intègre pas de données spatiales. Or, ces dernières années, des progrès considérables ont été réalisés par les archéologues dans l'acquisition des données spatiales, leur positionnement de manière précise à l'aide d'outils sophistiqués (GPS) et leur analyse à l'aide d'applications informatiques élaborées : les Systèmes d'Informations Géographiques. Les applications des SIG sont assez récentes et vouées à un avenir prometteur dans la discipline.

En plus des informations géométriques et descriptives, ces dernières peuvent ouvrir un potentiel d'analyses, de simulations touchant le domaine de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, sans compter l'apport considérable en connaissances que pourra apporter l'association de ces données graphiques avec des données descriptives et documentaires pour la gestion des bâtiments, tant du point de vue technique que patrimonial.

En effet, les données recueillies sur un chantier de fouilles archéologiques possèdent toutes une composante spatiale : elles ont été retrouvées à un endroit déterminé par des composantes (X, Y, Z). Mais plus encore que leurs positions exactes, ce sont les relations spatiales entre ces entités au sein d'un même site archéologique qui sont les plus importantes pour les archéologues en vue de la reconstitution de processus culturels. Ainsi, une des perspectives de ce projet serait de coupler au Système d'Information existant les données spatiales recueillies sur le terrain. ●

Contacts

Céline PIACENTILE

celine.piacentile@live.fr

celine.piacentile@insa-strasbourg.fr

Elise MEYER

ATER en Topographie

MAP-PAGE, INSA de Strasbourg

elise.meyer@insa-strasbourg.fr

Références

- Eiteljorg, H. II., Center for the Study of Architecture. [2002],** *The CSA CAD Guide for Archaeologists and Architectural Historians.*
URL <http://csanet.org/inftech/cadgd/cadgd.html>
- Metzler, J., Zimmer, J. et Bakker, L. [1981],** *Ausgrabungen in Echternach.* Publication du Ministère des Affaires Culturelles et de la ville d'Echternach, Luxembourg. 394 pages.
- Meyer, E., Grussenmeyer, P., Perrin, J.-P., Durand, A. et Drap, P. [2007],** *A web information system for the management and the dissemination of Cultural Heritage data.* In, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 8, Issue 4, Septembre-Décembre 2007, Pages 396-411. doi:10.1016/j.culher.2007.07.003
- Meyer, E., Grussenmeyer, P., Perrin J.P., Durand, A. et Drap, P. [2006],** *Intra-site Level Cultural Heritage Documentation: Combination of Survey, Modeling and Imagery Data in Web Information System;* Short papers from the joint event CIPA/VAST/EG/EuroMed 2006, M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania (Editors), Nicosia Cyprus, 30 Octobre-4 Novembre 2006. ISBN-10 : 963 8046 74 0. p.129-134/ 238.
- Meyer, E. [2007],** *Acquisition 3D, documentation et restitution en archéologie : proposition d'un modèle de Système d'Information dédié au patrimoine.* Thèse de Doctorat en Modélisation et Simulation des Espaces Bâti, UHP Nancy 1. Soutenue le 31 octobre 2007 à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, 305p.
- Pimpaud, A.B. [1999],** *Les applications de l'infographie 3D à l'archéologie. Mémoire de maîtrise d'histoire de l'art et d'archéologie* soutenu à l'Université de Paris-X-Nanterre, sous la direction de Mme A.-M. Guimier-Sorbets.
URL http://pimpaud.free.fr/wordpress/wp-content/uploads/2006/05/maîtrise_pimpaud.pdf
- Topol, A. [2001],** *VRML : étude, mise en œuvre et applications.* Mémoire d'ingénieur CNAM.
URL <http://cedric.cnam.fr/PUBLIS/RC263.pdf>
- Web3D@ [2004],** WEB3D-fr - URL <http://www.web3d-fr.com/>

ABSTRACT

Key words : Archaeological heritage, interactive 2D plans and 3D models, SVG, VRML

Archaeology belongs to today's science and therefore uses recent computer graphics tools especially for 2D and 3D renderings. It is essential to grasp how this practice can serve the interests of archaeology, first concerning the archaeologist's work itself, then making data easily available for the general public.
The approach developed in this work will outline several methods to create interactive 2D plans and 3D models on the web to be used by professionals dealing with the archaeological heritage. The aim is to transfer automatically 2D and 3D drawings from the AutoCAD system into interactive SVG plans and/or VRML 3D models. Indeed, the whole point is once an interesting place has been located, the user will click on the item and obtain interesting information simultaneously.

Le point sur le GMES

■ Yves RIALANT

Depuis 1972, Les satellites d'observation de la terre n'ont cessé d'évoluer au bénéfice d'une surveillance accrue du sol, rendue urgente par une conscience écologique renforcée par les désordres constatés. De nombreux organismes y contribuent dans le cadre de programmes thématiques, nationaux ou internationaux, mais c'est dans leur capacité à collaborer et à offrir de nouveaux services que résident les espoirs les plus récents. En Europe cet espoir s'appelle GMES.

Depuis la fin des années soixante, les enjeux relatifs à l'environnement occupent une place croissante dans l'espace public. Ils ont suscité le développement de mouvements sociaux, de réseaux associatifs et de partis politiques. Ils ont progressivement été intégrés, avec une position plus ou moins prioritaire selon les conjonctures et les pays, dans les discours et les programmes politiques et ils sont naturellement présents aux Nations Unies à travers de nombreux programmes, tels que le PNUE "Programme des Nations Unies pour l'environnement".

Surveiller l'environnement n'est que la transposition à l'échelle de la société et de la planète d'un comportement de vigilance auquel notre espèce doit sa survie. Pour apprécier tous les effets, immédiats ou lointains, des interactions entre l'homme et les milieux naturels, on se trouve devant un défi scientifique et technique considérable : pour y répondre, il faut organiser des réseaux, développer des méthodes et des instruments mais aussi mobiliser toutes les parties prenantes et, en raison des coûts, faire des choix : que veut-on protéger ou surveiller en priorité ? Jusqu'où va-t-on ? Qui est responsable ? Qui finance ?

On doit également aborder la question de la coordination entre tous ces réseaux développés pour certains à l'échelon national, et pour d'autres au niveau mondial. Autre aspect du problème pour être efficace il faut arrimer les systèmes de surveillance aux processus décisionnels : plus les informations sont précises et disponibles en temps voulu, plus les décideurs sont en mesure d'agir efficacement, et il est devenu urgent d'agir.

La Conférence de Stockholm, qui s'est fait l'écho de la conscience écologique embryonnaire des années 60, a représenté le premier engagement officiel international tendant à intégrer écologie et développement. La même année, en 1972, le Club de Rome, organisme regroupant des économistes et des scientifiques européens, prenait conscience que les limites de la tolérance de l'environnement aux interventions humaines étaient atteintes et que l'avenir de la planète serait compromis si aucune action n'était entreprise.

Après la Conférence de Rio en 1992, les Nations Unies établirent des priorités en matière de développement durable dans toute leur structure, et travaillèrent à l'élaboration d'accords internationaux et d'instruments juridiques intégrant les principes adoptés lors de la conférence. Les Etats membres s'engagèrent à tenir compte du plan d'action de la conférence de Rio (CNUED) dans leurs institutions, leurs politiques et leurs relations internationales, veillant à prendre en considération l'impact écologique et mondial de leurs décisions. Les organisations non gouvernementales, de même que la communauté scientifique, la société civile et le monde des affaires ont également à y prendre part.

Depuis la fin de la Guerre froide, les agences spatiales se sont largement recentrées sur les questions de sécurité environnementale et participent à l'expansion d'un réseau de satellites équipés de capteurs optiques, infrarouges et radars destinés à la surveillance de la planète. Ces satellites constituent parfois le seul moyen pour recueillir les données indispensables à la compréhension et à la prévision des modifications – d'origine humaine ou naturelle – qui affectent l'atmosphère, les terres et les océans. Cependant, les satellites sont des produits d'entreprises coûteuses, et l'observation planétaire in situ ne l'est guère moins.

Les organisations destinées à coordonner au plan international l'observation et la recherche sont complexes car elles résultent comme on l'a vu d'initiatives venant d'horizons divers, étalées dans le temps, qui s'imbriquent et s'empilent les unes sur les autres, sans que les simplifications et les regroupements qui s'imposent au fil du temps aient toujours été pris en compte. Dans la majorité des pays, ils dépendent financièrement et structurellement de la recherche et cela rejailit sur les structures des organisations internationales.

Ceci a conduit à un foisonnement de systèmes d'observation de la Terre dont les origines sont multiples. On peut distinguer ceux issus de la prise de conscience récente de l'importance de la question de l'environnement par de grands rassemblements politiques internationaux (G8,...), ceux issus des agences spatiales, ceux issus des agences traditionnelles de l'ONU et ceux qui sont issus de la recherche.

A l'occasion du troisième sommet de la terre en 2005 a été créé pour dix ans le "Groupe d'Observation de la terre GEO", ce groupe *ad hoc* a reçu la mission de mettre en place un système global d'observation de la terre dénommé GEOSS.

Tout en gardant l'indépendance de chaque système d'observation existant, in situ ou spatial, il s'agit de garantir leur interopérabilité de façon à les rendre plus efficaces au bénéfice de neuf domaines thématiques de la gestion de l'environnement et des risques, dont le climat, les questions de santé humaine liées à l'environnement, les ressources alimentaires, l'énergie, les ressources en eau, la prévision du temps et les alertes, la



protection des écosystèmes marins et les risques naturels. Le désir de partager les dépenses a joué son rôle dans la décision.

Les objectifs de la politique européenne de l'environnement sont la préservation, la protection et l'amélioration de la qualité de l'environnement, la protection de la santé des personnes, l'utilisation prudente et rationnelle des ressources naturelles, la protection sur le plan international, des mesures destinées à faire face aux problèmes régionaux ou planétaires de l'environnement.

Cette politique est fondée sur deux grands principes :

- le principe de précaution
- le principe de pollueur-payeur

Pour financer ses actions de protection et de mise en valeur de l'environnement, l'UE a disposé en 2007 d'un budget de 200 millions d'euros.

Pour assurer le suivi de ses politiques en matière d'Environnement, la Commission et le Parlement ont lancé, en 2005, le projet de Directive INSPIRE visant à doter l'Europe d'une Infrastructure de données géolocalisées homogènes sur le territoire communautaire à des fins de contrôle et parallèlement, poussé par les agences spatiales et repris par

l'agence pour l'Environnement, a été lancé le projet GMES Global Monitoring for Environment and Security.

INSPIRE est une infrastructure et GMES une offre de service disponible sur cette infrastructure. En fait INSPIRE va devenir un chapitre de GMES.

Une gestion efficace des données et le partage des informations sont les conditions indispensables à la production de services GMES. GMES constituera ainsi un outil essentiel pour accroître l'interopérabilité des systèmes nationaux et favoriser le développement de normes européennes adéquates. GMES favorisera le développement de relations bilatérales entre l'UE et ses partenaires internationaux.

Dans son rôle fédérateur, GMES représentera la principale contribution européenne au plan stratégique décennal de mise en œuvre du réseau mondial de systèmes d'observation de la Terre (GEOSS). ●

Contact

Yves RIALANT

yves.riallant@afigeo.asso.fr

PUBLICATIONS DE L'AFT

Retourner ce bulletin accompagné du règlement à l'Association Française de Topographie

107, rue de la Boétie - 75008 Paris - Tél. : 01 43 98 84 80 – Fax : 01 42 25 41 07 - Courriel : info@aftopo.org

Titre	Auteur	Qté	PU (TTC)	TOTAL
Sciences géographiques dans l'Antiquité	Raymond d'Hollander		55,10 €	
Mesurer la Terre 300 ans de géodésie	J.-J. Levallois		41,10 €	
Lexique topographique			15,20 €	
Total				

Frais de port inclus

M./Mme/Mlle Nom : _____ Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Secteur d'activité : _____

Adresse : _____

Code postal : [][][][][][] Ville : _____

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

Courriel : _____

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

☐ Je désire recevoir une facture

Géoréférencer par-delà les frontières, un nouveau défi du SITG

■ Laurent NIGGELER

L'Institut Géographique National de la République Française (IGN) devient partenaire du Système d'information du territoire genevois - SITG. Cette collaboration est un réel atout pour l'ensemble de la région car elle permet l'échange et l'harmonisation de données géographiquement référencées sur le territoire suisse et français. Dès lors, il sera possible de réaliser des plans transfrontaliers aussi utiles pour les projets régionaux que pour les citoyens.

Au début des années 90, l'État de Genève, la Ville de Genève, les communes genevoises et les services industriels ont ressenti la nécessité de créer un partenariat dans le but de mettre en commun leurs compétences et leurs ressources en matière d'information géoréférencée sur le territoire genevois. Guidés par ces principes fondateurs formalisés par une charte, ils ont ainsi créé une plate-forme d'échange et un outil commun qui permet de faciliter la consultation et l'utilisation d'informations géoréférencées ayant trait au territoire.

Ainsi est né le SITG - système d'information du territoire genevois.

Dès lors, un travail méticuleux de géoréférencement du territoire genevois a été entrepris. Les domaines d'action ne manquent pas : données sur le patrimoine architectural de la ville, forêts du canton, niveaux de bruit routier, répartition de la pollution de l'air, réseau hydrographique du bassin lémanique ou réseau souterrain de canalisation sont autant de matières qui font l'objet de cartes géoréférencées et permettent d'effectuer des recoupements. Ainsi les décideurs peuvent s'appuyer sur des représentations synthétiques du territoire afin de mettre en place des stratégies pour l'avenir de leur région.

Entouré de quelque 100 kilomètres de frontière avec la France et de 4 avec le reste de la Suisse, l'histoire de Genève est intimement liée à celle de ses voisins. Le tracé des frontières n'a cessé de se modifier au fil des péripéties, des adhésions et des négociations. De nos jours, les autorités ne cherchent plus à conquérir ou préserver des territoires mais doivent faire face à d'autres enjeux liés à une société en pleine expansion ; elles doivent répondre à des besoins aussi divers et vitaux que sont le logement, l'emploi, la mobilité, la préservation de l'environnement ou les flux économiques.

Dans ce contexte, il n'est plus envisageable de penser en termes de frontières nationales mais il est impératif de conce-



voir le développement de la région à une plus large échelle. De fait, l'administration genevoise vit une véritable remise en cause de sa manière de travailler, en s'engageant dans des processus non seulement transversaux mais aussi transfrontaliers. Dans ce même souci d'homogénéisation et de coopération, l'Institut Géographique National de la République française s'est intéressé, il y a plus de deux ans, aux principes qui régissent le Système d'information du territoire genevois.

L'entrée de l'IGN dans le partenariat des différentes institutions maîtresses qui composent le Système d'information du territoire genevois peut être considérée comme une borne, non pas une borne frontière visant à séparer, mais comme une borne symbolique jalonnant un événement : la signature d'un pacte dont la portée mène toute une région à projeter un territoire dans l'avenir, sur un plan global dépassant les frontières.

Il faut relever également que la consolidation des liens entre le SITG et l'IGN crée des synergies à un niveau national et régional car depuis peu, des rencontres ont été organisées avec des représentants de l'Etat, de l'IGN, des départements de l'Ain et de la Haute-Savoie ainsi que de Swisstopo afin de mettre en place une coopération efficace et rationnelle entre les acteurs "métiers" de la géoinformation. D'une certaine manière, nous sommes aux prémices d'une vision européenne de la cartographie et notre coopération franco-genevoise en est le terrain de jeu !

En effet, aujourd'hui la région du Genevois peut être pionnière dans l'harmonisation des données géographiques à grande échelle et juxtaposer les réseaux hydrographiques, forestiers,

routiers, parcellaires et tant d'autres. Il est possible également d'envisager de réaliser ensemble la prochaine édition de photographies aériennes de la région et dégager ainsi de substantielles économies.

Un énorme travail d'agrégation et de mise en corrélation des données cartographiques françaises et suisses est déjà en cours dans les services de l'administration afin de concevoir un extraordinaire outil au service de l'ensemble du territoire franco-valdo-genevois.

L'une des premières matérialisations de cette opération sera l'inauguration du premier portail géographique français intégrant des informations de part et d'autre de la frontière. Cette représentation permettra aux citoyens, professionnels, élus et décideurs d'appréhender visuellement le territoire selon une approche large, globale et complète, en effaçant des cartes les "zones blanches" inhérentes autrefois, on peut le dire, au manque de perméabilité des administrations.

Plusieurs autres réalisations sont en cours de travail ; on peut citer notamment un plan régional transfrontalier.

Journée du SITG 2007

Tous les deux ans, le SITG ouvre ses "systèmes et ses cartes" afin d'échanger et d'approfondir ses connaissances avec l'appui et l'expérience d'autres professionnels.

En 2007, les partenaires du Système d'information du territoire genevois - SITG ont accueilli l'Institut Géographique National - IGN - de France. Pour marquer symboliquement cet événement, la journée professionnelle du vendredi 20 avril a présenté un programme basé sur les données transfrontalières et a eu lieu dans l'ancienne commune française de Versoix, rattachée depuis 1815 à Genève. Versoix étant la première commune accueillant et contribuant à l'organisation de la journée.

Le programme a été établi pour montrer que l'harmonisation des géodonnées et la collaboration entre les différents acteurs de la géoinformation ne s'arrêtent pas aux frontières ; les travaux dans ces domaines tant au niveau de la Suisse que de l'Europe sont en pleine discussion et que leur mise en place interviendra à brève échéance.

Plus de 350 professionnels venus de France et de Suisse se sont déplacés à Versoix le 20 avril 2007. Ils ont pu prendre connaissance du concept des données transfrontalières au niveau européen, découvrir les enjeux de l'IGN pour son partenariat avec le SITG, se faire une opinion sur la stratégie de la Confédération suisse en matière de géodonnées, apprécier la directive européenne INSPIRE sur les géodonnées et finalement découvrir le projet d'agglomération franco-valdo-genevois, grand utilisateur de données transfrontalières.

L'après-midi a été consacré à des ateliers permettant l'échange et l'interaction entre les participants. Les présentations d'une quinzaine de projets innovants ont été réparties en trois grandes thématiques : les données, les technologies de l'information et les réalisations. En parallèle, une quinzaine de stands ont été mis sur pied afin de découvrir les dernières

techniques de la cartographie moderne, de l'utilisation des outils SIG et la valorisation des géodonnées.

Un autre thème particulier a également été mis à l'honneur, la 3D. Aujourd'hui, les géomaticiens, ces créateurs de visions surréalistes mais pourtant bien concrètes du territoire, planchent sur des représentations intégrant une troisième donnée spatiale. La cartographie en 3 dimensions est en plein essor. Les projets ciblent par exemple la création d'images présentant la hauteur des bâtiments, leur structure et leur impact visuel sur l'environnement urbain. Pouvoir montrer un projet d'aménagement avec cette dimension supplémentaire devient une réalité et permettra de rapprocher les concepteurs, les décideurs et les citoyens.

La journée des professionnels a été complétée par d'autres journées visant à recevoir la population, le corps enseignant et les élèves (11 classes). L'objectif a consisté à favoriser le dialogue entre les spécialistes de l'information géographique et le public. Cette manifestation a été soutenue par la société ESRI.

Les actes de cette manifestation sont disponibles sur le site du SITG www.sitg.ch ou directement sous www.ge.ch/SITG2007

Une exposition interactive

Cet événement a été accompagné d'une exposition interactive intitulée "Territoire et jeux de cartes" qui plonge le visiteur dans un univers cartographique où les cartes montrent leurs dessous. Jeux, tests, manipulations et clics de souris permettent de comprendre comment les cartes sont conçues, superposées et utilisées pour constituer aujourd'hui un outil incontournable de la gestion moderne du territoire.



Dans un décor de cartes retraçant la représentation du territoire lémanique depuis le XVI^e siècle, une vingtaine de modules interactifs instructifs et ludiques présentent le passage de la cartographie traditionnelle aux techniques modernes de géomatique. De quoi donner envie à chacun de venir jouer aux cartes ! ●

Contact

Laurent Niggeler

laurent.niggeler@etat.ge.ch

Cet article, extrait du bulletin e-geo.ch N° 17 de juin 2007 (www.e-geo.ch/pub/down/publi/newsletter/N2007_17_fr.pdf) est publié avec l'aimable autorisation de l'auteur et du centre de compétence e-geo.ch.

La maquette virtuelle 3D au service de l'aménagement du territoire

■ Stéphane GOURGOUT

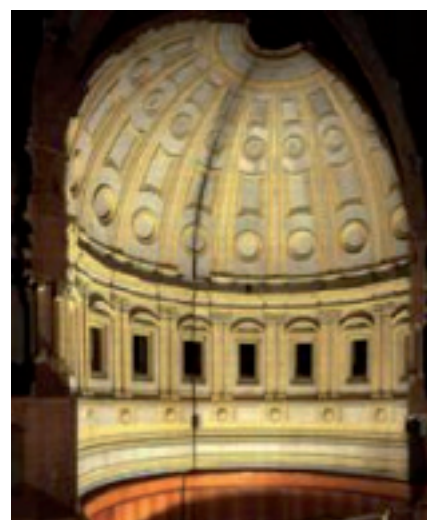
Les progrès fulgurants de l'informatique de ces 20 dernières années permettent aujourd'hui de représenter toute la complexité d'un territoire sous forme numérique en 3 dimensions avec une grande fidélité. Des logiciels de nouvelle génération permettent désormais de s'immerger dans ce territoire virtuel, de l'observer et t'interagir avec lui en temps réel. Mais comment fonctionnent ces nouveaux logiciels de modélisation du territoire ? Ces maquettes peuvent-elles servir les études en aménagement ? Quels en sont leurs domaines d'applications ? A quels publics sont-elles destinées ? Enfin, quel niveau d'expertise 3D sont requis pour manipuler ces produits ?

Depuis toujours, ingénieurs et architectes ont eu besoin de "simuler" leurs études du territoire. Des multiples projets de jardins d'André Le Nôtre pour Versailles au projet "Pharaonique" du Canal de Suez proposé par Louis Linant de Bellefonds, tous avaient ce besoin de représenter leur projet de manière le plus fidèle possible avant sa réalisation même si les objectifs différaient. Le Nôtre cherchait à séduire son Roi alors que Linant de Bellefonds cherchait à étudier sa faisabilité et à se faire comprendre par des investisseurs jusqu'au jour où il rencontra Ferdinand de Lesseps.

Mais ces simulations, sous forme de dessins, étaient la plupart du temps très approximatives. Elles portaient en elles

une sensibilité plus esthétique qu'une reproduction fidèle de la réalité. A cette époque, l'image trichait déjà et on lui faisait donc dire ce que l'on souhaitait. Il faut attendre l'invention de la perspective au XVIII^e siècle pour donner naissance aux premières maquettes 3D sur le principe de la réduction d'échelle et de la miniaturisation mathématique et fidèle.

La première maquette connue, celle de Michel Ange, réalisée pour la coupole de St Pierre de Rome au XVIII^e siècle, fournit pour la première fois dans l'histoire des bases d'étude réalistes et fiables pour l'étude et la présentation d'un projet. Elle permit entre autres l'étude de l'acoustique et du jeu complexe de la lumière au cours de la journée à l'intérieur de la coupole.



Michel Ange - La coupole de St Pierre de Rome - Modifiée par della Porta puis "annotée" par Vanvitelli au XVIII^e siècle.

L'invention de la photographie au début du XIX^e siècle offre une projection 2D "exacte" de notre monde 3D. Les cartes et les photos deviennent alors des moyens privilégiés pour l'analyse et la communication en géographie et l'analyse du territoire. Elle sert à mieux comprendre l'espace, les terrains et les paysages à partir de vues réelles. Mais leur qualité et leur résolution restent pauvres rendant leur interprétation difficile et



André Le Nôtre - Projet des 3 fontaines à Versailles (1677).



Louis Linant de Bellefonds - "Vue du projet du canal de Suez" (1823-1833).



Carte d'Etat-Major - XIX^e siècle, monochrome, où le relief est représenté par des hachures...

assez aléatoire pour fournir des bases d'étude fiables.

Au XX^e siècle, les progrès des transports aériens et de la photographie révolutionnent les cartes géographiques et par-là même notre connaissance du territoire. En particulier, la photographie aérienne moderne permet d'obtenir des cartes numériques, désormais fiables et très précises de notre paysage.

L'informatique donne alors naissance à l'ère "virtuelle". Le développement des systèmes d'information géographique, la démocratisation des photos aériennes à haute résolution, l'effet Google Earth suivi depuis par Microsoft Virtual Earth et la multiplication des logiciels de modélisation et de simulation offrent désormais tous les prérequis nécessaires au développement de logiciels perfectionnés permettant de simuler le paysage et ses transformations avec précision et réalisme. Ils combinent la modélisation 3D et Photo aérienne pour restituer un modèle 3D fiable de notre planète.

Ainsi, le logiciel LandSIM3D[®] développé par Bionatics, une société française basée à Montpellier (34) est un exemple des dernières avancées technologiques les plus stupéfiantes en la matière.

La 3D au service du territoire

La maquette "virtuelle" du territoire constitue une véritable révolution. Elle annule les limites posées par le niveau de détail et le principe de réduction à

l'échelle et elle offre la possibilité de "s'immerger" dans le projet à n'importe quel niveau de détail. Elle offre des atouts considérables pour l'étude et l'aménagement du territoire ou du paysage en permettant :

- de modéliser un périmètre plus vaste que le site du projet pour étudier le projet dans son contexte,
- reconstituer un site existant à des fins d'analyse (relief, lignes de force, ambiance, textures...),
- les études de perception visuelles, de co-visibilité (d'où l'on voit, qu'est-ce qu'on voit, pourquoi ?),
- l'intégration d'un projet dans le site et son impact immédiat ou à l'échelle du territoire,
- l'étude et l'illustration des évolutions temporelles du projet et de son environnement.

Comment modéliser le territoire avec LandSIM3D[®] ?

LandSIM3D[®] est un logiciel de modélisation et de visualisation 3D interactif du territoire. Il fonctionne à partir du chargement de données géographiques (points altimétriques x, y, z, données vecteurs ou rasters) décrivant la topographie, la topologie et la nature du territoire (terrain, réseaux, bâtiments, occupation du sol, orthophoto...). LandSIM3D

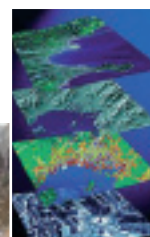
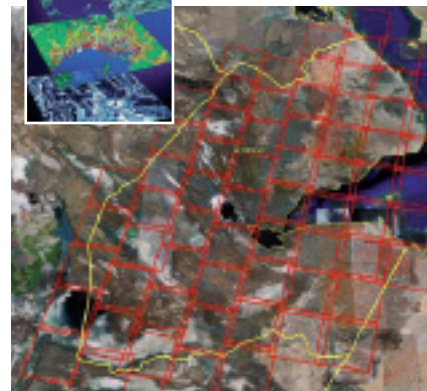


Image satellite - SPOT Image.



permet de facilement transformer ces données en une représentation virtuelle 3D et réaliste à toutes les échelles et de venir y insérer des projets d'architecture, d'urbanisme, d'infrastructure ou d'aménagement du paysage pour en étudier leurs variantes et leurs impacts sur le territoire ou leur environnement immédiat.

Le paysage existant peut donc être modélisé à partir de données géographiques fiables issues par exemple des instituts géographiques nationaux (en France, l'IGN), de cabinets de géomètres ou de prestataires externes en Géomatique. Les données sont corrélées entre elles automatiquement grâce au géo-référencement.



Extrait de la Base de Données IGN BDORTHO[®] et BDTOPO[®] - visualisé par LandSIM3D[®].

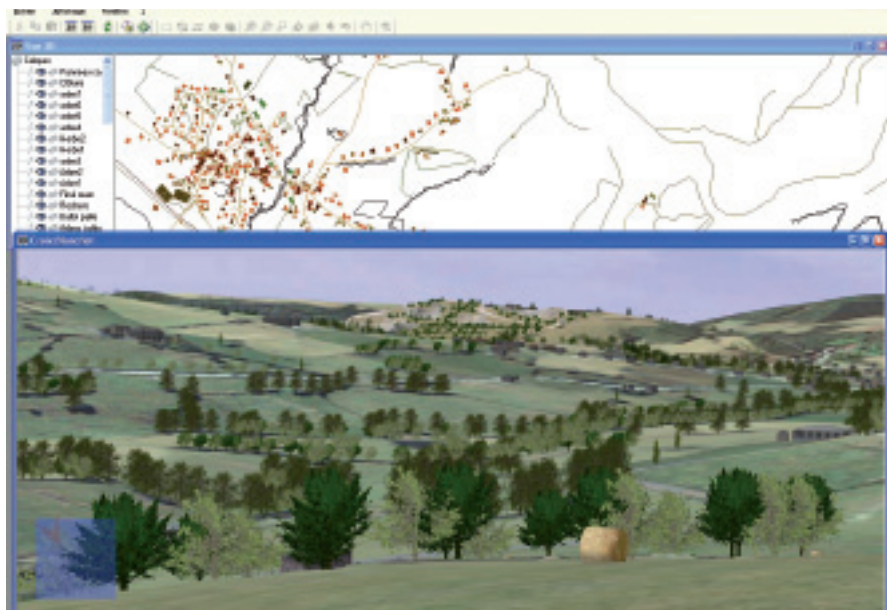


Image source : Bureau d'études ENCEM pour LAFARGE – Projet de fermeture d'une carrière et réhabilitation du site.



Image source : Bureau d'études SCOTT WILSON – Projet d'autoroute A6 (Irlande) reliant Belfast à Londonderry sur 16 km.



Les données d'élévation permettent de modéliser le relief du paysage. Elles sont fournies par des géomètres-experts, des sociétés de prestations de services spécialisées ou bien par l'Institut Géographique National grâce à la BDAlti®. Les images aériennes (Orthophotos) donnent une visualisation réaliste de l'existant. Elles restituent avec réalisme la texture du sol existant et l'atmosphère d'un paysage. Les Ortho-photos peuvent être récupérées à des niveaux de résolutions différentes. Le coût est souvent proportionnel à leur niveau de définition. Les cartes numériques permettent de connaître l'occupation réelle du sol. Elles permettent de modéliser automatiquement les infrastructures, les bâtiments et la végétation d'un territoire. Les cartes numériques permettent également de reproduire un tissu urbain en 3D automatiquement. Elles sont souvent issues des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) dont disposent les collectivités. L'Institut Géographique National propose la BDTopo® à l'échelle du territoire français avec des données plus ou moins fines selon les zones couvertes.

Une fois modélisé, le paysage existant peut être visualisé et manipulé en 3 dimensions à des fins d'analyse. La maquette 3D du paysage, géo-référencée, peut être ensuite "végétalisée" au travers de biotopes naturels, reconsti-

tués grâce à un simulateur de plantes développé à partir des recherches botaniques et scientifiques du laboratoire du CIRAD de Montpellier. Les plantes, géo-spécifiques, poussent, grandissent et fleurissent comme des vraies.

Véritables clones du réel, elles donnent au paysage 3D numérique son côté réaliste. Une fois le paysage reconstitué, son évolution peut ainsi être simulée au cours du temps avec une véritable cohérence botanique. Les transformations du paysage peuvent y être simulées comme le changement des saisons. La maquette peut être manipulée en temps réel devant un écran et la réflexion partagée collectivement.

Une fois le paysage modélisé, le projet peut y être importé puis inséré avec précision. Ses phasages au cours du temps peuvent être simulés dans le contexte réel. Le projet peut en effet être simulé entièrement dans la maquette 3D du site existant ou bien importé depuis des logiciels de modélisation topographique spécialisés. Le projet peut être désormais visualisé dans la maquette 3D du site existant. Le géo-référencement garantit une intégration fiable au relief naturel du terrain. Chacun peut alors disposer d'une vision commune du projet et partager ses points de vue.

Des alternatives au projet initial peuvent également être intégrées et visualisées

dans la maquette 3D du site existant.

La maquette 3D de paysage n'est qu'une évolution des méthodes d'étude actuelles :

- Elle s'intègre aux logiques d'étude et de conceptions traditionnelles déjà en place dans la plupart des bureaux d'études en aménagement du paysage.
- Elle ne change en rien les acquis mais utilise la donnée produite par le métier pour la valoriser autrement.
- Elle est rapide à mettre en œuvre et ne requiert plus de compétence métier exclusive (infographie 3D).

Ces maquettes numériques du paysage permettent un réel partage de la vision d'un paysage depuis ces phases d'analyse et d'étude les plus initiales jusqu'aux phases de présentation et de concertation avec les populations concernées. Les modes de visualisation sont nombreux, de la simple image ou animation aux rendus conceptuels jusqu'à la navigation 3D temps réel et ultra réaliste permettant à tout un chacun de visualiser le projet depuis un point de vue précis qui l'intéresse. ●

Contact

Stéphane GOURGOUT

Vice-Président Exécutif - Directeur Commercial

<http://www.landsim3d.com>

gourgout@bionatics.com

Comparaison du positionnement temps réel classique RTK et du positionnement GPS temps réel réseau

Mise en œuvre dans le réseau ORPHEON

■ Laurent MOREL - Stéphane DURAND

MOTS-CLÉS

RTK, Réseau Temps Réel, Orphéon, MAC

Plusieurs réseaux GPS temps réel poursuivent leur implantation sur le territoire national pour délivrer de nouveaux services de

positionnement par GNSS. En s'appuyant sur les principes du RTK avec une seule station, cet article explicite le concept maître auxiliaire à la base de la nouvelle norme de transmission RTCM version 3. Nous présentons ensuite les résultats d'une campagne de mesures mettant en œuvre ces deux types de positionnement : le RTK classique et le RTK dans le réseau Orphéon. Afin de comparer ces deux modes de positionnement RTK, nous avons fait varier la distance à la station de référence utilisée pour le mode RTK classique, utilisé les mêmes observations pour les deux calculs en temps réel, considéré différents environnements (rural, semi-urbain, urbain). Nous avons également comparé les positions RTK à des positions RGF93 obtenues par post-traitement. Les principaux résultats montrent une précision du positionnement RTK réseau d'au moins aussi bonne qualité que le positionnement RTK classique et de l'ordre de 2 cm. Les temps d'initialisation sont également similaires et proches de 10 secondes en moyenne.

Introduction

Ces dernières années, la France se retrouve dans une situation plutôt privilégiée en ce qui concerne l'évolution des services pour le positionnement par GNSS. Alors que nombre de nos voisins européens possèdent un, voire plusieurs réseaux temps réel, la métropole française dispose actuellement de trois réseaux privés dont le but est de couvrir l'ensemble du territoire : Orphéon, Teria et S@t-info. Ainsi il existe une offre diversifiée allant au-delà du simple choix économique de l'opérateur. D'un point de vue technologique, ces trois réseaux font cohabiter trois techniques différentes pour le calcul et la modélisation des corrections RTK : le concept MAC pour Orphéon, le FKP pour Teria et le VRS pour S@t-info.

Cette émulation s'accompagne par ailleurs d'un contexte légal sans équivoque puisque la récente promulgation de l'obligation de se rattacher au RGF93 à partir de 2009 et des projections Coniques Conformées 9 zones lève, s'il en était besoin, les dernières réticences au rattachement en RGF93. Avec un réseau GNSS temps réel, l'opération de rattachement est considérablement facilitée car immédiate en RGF93, compte tenu que les stations du réseau sont connues dans ce système.

Toutefois, comme pour toute nouvelle technologie, sa mise en place doit s'accompagner de formations et d'informations. Il s'agit de rassurer l'utilisateur en lui procurant le plus d'éléments possible pour lui permettre d'employer, d'évaluer et d'optimiser cette nouvelle technique dans ses travaux. Bien entendu, plus les techniques évoluent et plus il devient complexe d'en maîtriser tous les aspects. Mais les topographes doivent s'en saisir entre autres pour prendre les bonnes orientations en considérant notamment des réels apports techniques.

Cet article a le souhait de réaliser ces objectifs en rapportant les résultats d'une campagne test dans le réseau temps réel Orphéon. La première partie fournit quelques rappels sur le temps réel cinématique (RTK) afin d'introduire plus aisément le Concept Maître Auxiliaire (MAC) et ses produits réseaux dérivés dans une seconde partie. Dans une troisième partie, la campagne de tests sera décrite en insistant sur son caractère reproductible. La quatrième partie décrit les observations et le calcul des points de référence dans le RGF93 et la cinquième partie compare le positionnement GPS dans le réseau Orphéon par rapport à un positionnement RTK classique.

Rappels sur le positionnement cinématique temps réel (RTK)

Cette technique de positionnement par GPS est apparue au début des années 1990 et a progressivement remplacé les techniques dites de Stop and Go, utilisées plus particulièrement dans le cadre des opérations de levé. Le principe est le différentiel GPS avec un récepteur fixe sur un point connu (station de l'utilisateur ou station d'un réseau) et un récepteur mobile qui se déplace sur des points dont on souhaite déterminer précisément les coordonnées. Les deux récepteurs réalisent des

▶ observations de déphasage et de décalage de temps, qui peuvent être modélisées de la manière suivante (Leick, 2004) :

$$L_i^j = \lambda \phi_i^j = \rho_i^j + c(dt_i^j - dt_i) - \lambda N_i^j + \rho_i^{j,iono} + \rho_i^{j,tropo} \quad (1)$$

$$R_i^j = c\Delta t_i^j = \rho_i^j + c(dt_i^j - dt_i) - \rho_i^{j,iono} + \rho_i^{j,tropo} \quad (2)$$

Avec :

ϕ_i^j : déphasage observé (en cycles)

Δt_i^j : observation de décalage de temps

ρ_i^j : distance géométrique entre le récepteur i et le satellite j

dt_i^j : décalage de l'horloge satellite par rapport au temps GPS

dt_i : décalage de l'horloge récepteur par rapport au temps GPS

N_i^j : terme d'ambiguïté entière

$\rho_i^{j,iono}$: correction de distance due à la traversée de l'ionosphère

$\rho_i^{j,tropo}$: correction de distance due à la traversée de la troposphère

Le récepteur fixe, communément appelé la référence ou la base, transmet ses observations et ses coordonnées par l'intermédiaire d'un modem (radio, GSM ou GPRS) au récepteur mobile qui les reçoit grâce à un modem équivalent. Le mobile dispose donc de ses propres observations, de celles de la référence sur les mêmes satellites et également des coordonnées connues de la référence. Différents formats, propriétaires ou ouverts peuvent être utilisés pour la transmission de ces informations et nous avons choisi d'utiliser dans notre campagne la norme internationale élaborée par l'organisation américaine Radio Technical Commission Maritime (RTCM) dans sa version 2.3, disponible sur la plupart des récepteurs GNSS. Comme dans un logiciel de post-traitement, le récepteur mobile réalise un calcul de ligne de base avec des algorithmes pour élaborer les doubles différences de phase, déterminer les valeurs flottantes des ambiguïtés (et les valeurs provisoires des autres paramètres), fixer les ambiguïtés et résoudre finalement les autres paramètres dont la position du mobile. Si l'on note $\Delta \nabla$ l'opérateur de double différenciation, l'expression d'une double différence entre référence (ref) et mobile (mob) sur les satellites j et k est :

$$\Delta \nabla \phi_{ref,mob}^{j,k} = \Delta \nabla \rho_{ref,mob}^{j,k} - \lambda \Delta \nabla N_{ref,mob}^{j,k} + \Delta \nabla \rho_{ref,mob}^{j,k,iono} + \Delta \nabla \rho_{ref,mob}^{j,k,tropo} \quad (3)$$

Cette première méthode s'appuie sur la transmission des observations brutes contenues dans les messages 18 (observations de phase) et 19 (observations de pseudo-distance) au format RTCM 2.3 ainsi que sur les messages 3 et 22 (position du centre de phase de l'antenne de la référence).

Une autre possibilité est offerte par la transmission des corrections des mesures plutôt que de mesures brutes, avec les messages 20 (corrections de phase) et 21 (corrections de pseudo-distance) au format RTCM 2.3. Les étapes suivantes décrivent succinctement la procédure d'utilisation de ces corrections :

• **Elaboration des corrections à la base pour tous les satellites :** Etant donné que la position du récepteur fixe est connue, on peut calculer les distances géométriques (ρ_{ref}^j) entre ce récep-

teur et tous les satellites et les retrancher aux observations brutes. La correction est alors la différence entre l'observation et la distance géométrique :

$$Corr\phi_{ref}^j = \lambda \phi_{ref}^j - \rho_{ref}^j = c(dt_{ref}^j - dt_{ref}) - \lambda N_{ref}^j + \rho_{ref}^{j,iono} + \rho_{ref}^{j,tropo} \quad (4)$$

• Transmission des corrections au mobile

La transmission se fait en utilisant les messages RTCM version 2.3 de type 20 et 21. La latence, qui correspond au délai entre l'instant d'observation par le récepteur fixe et l'application de la correction au récepteur mobile, dépend principalement du vecteur utilisé pour la transmission (GSM, radio, GPRS) et de la quantité de données à transmettre.

• Application des corrections au mobile

Le mobile retranche simplement la correction $Corr\phi_{ref}^j$ à sa propre mesure ϕ_{mob}^j , pour obtenir une mesure corrigée $\delta\phi_{ref,mob}^j$

$$\begin{aligned} \delta\phi_{ref,mob}^j &= \lambda \phi_{mob}^j - Corr\phi_{ref}^j \\ &= \lambda \phi_{mob}^j - (\lambda \phi_{ref}^j - \rho_{ref}^j) \\ &= \rho_{mob}^j + c(dt_{ref}^j - dt_{mob}) - \lambda N_{ref}^j + \rho_{mob}^{j,iono} + \rho_{mob}^{j,tropo} \\ &\quad - c(dt_{ref}^j - dt_{ref}) + \lambda N_{ref}^j - \rho_{ref}^{j,iono} - \rho_{ref}^{j,tropo} \\ &= \rho_{mob}^j - cdt_{mob} + cdt_{ref} - \lambda \Delta N_{ref,mob}^j + \Delta \rho_{ref,mob}^{j,iono} + \Delta \rho_{ref,mob}^{j,tropo} \end{aligned} \quad (5)$$

Cette mesure corrigée est très similaire à une simple différence entre les deux récepteurs. Pour la suite, exprimons ces mesures corrigées entre référence et mobile pour les satellites j et k :

$$\begin{aligned} \delta\phi_{ref,mob}^j &= \rho_{mob}^j - cdt_{mob} + cdt_{ref} - \lambda \Delta N_{ref,mob}^j + \Delta \rho_{ref,mob}^{j,iono} + \Delta \rho_{ref,mob}^{j,tropo} \\ \delta\phi_{ref,mob}^k &= \rho_{mob}^k - cdt_{mob} + cdt_{ref} - \lambda \Delta N_{ref,mob}^k + \Delta \rho_{ref,mob}^{k,iono} + \Delta \rho_{ref,mob}^{k,tropo} \end{aligned} \quad (6)$$

• Construction des simples différences sur satellite

La dernière étape consiste à différencier deux mesures corrigées sur deux satellites différents, j et k par exemple, pour obtenir une simple différence de mesures corrigées sur satellite :

$$\begin{aligned} SD_{ref,mob}^{j,k} &= \delta\phi_{ref,mob}^j - \delta\phi_{ref,mob}^k \\ &= \rho_{mob}^j - cdt_{mob} + cdt_{ref} - \lambda \Delta N_{ref,mob}^j + \Delta \rho_{ref,mob}^{j,iono} + \Delta \rho_{ref,mob}^{j,tropo} \\ &\quad - [\rho_{mob}^k - cdt_{mob} + cdt_{ref} - \lambda \Delta N_{ref,mob}^k + \Delta \rho_{ref,mob}^{k,iono} + \Delta \rho_{ref,mob}^{k,tropo}] \\ &= \Delta \rho_{mob}^{j,k} + \lambda \Delta \nabla N_{ref,mob}^{j,k} + \Delta \nabla \rho_{ref,mob}^{j,k,iono} + \Delta \nabla \rho_{ref,mob}^{j,k,tropo} \end{aligned} \quad (7)$$

Cette dernière équation de simple différence de mesures corrigées sur satellite est donc similaire à une Double Différence dans la méthode précédente à la seule différence que le terme connu de simple différence de distance géométrique est dans le membre de droite. D'un point de vue résolution, cela n'a strictement aucune influence et on peut donc appliquer les mêmes algorithmes que dans le cas précédent. Par contre cela explique qu'il ne sera pas nécessaire de transmettre la position de la station connue, qui est en fait contenue dans la correction transmise.

À l'étape 1, on peut aussi réduire la taille de la correction en modélisant partiellement dans l'observation de phase les décalages d'horloge (les dt_i sont calculables en partie à partir des messages de navigation et les dt_i sont toujours estimés à quelques microsecondes près dans une première phase de calcul). Dans ce cas, cette réduction devra aussi être faite au niveau du mobile avant d'appliquer l'étape 3.

Cette seconde méthode est équivalente à la première et offre

les avantages suivants : moins de bits sont nécessaires pour coder la correction par rapport à l'observation, les corrections sont moins sensibles au temps, le débit sera plus rapide, le récepteur est déchargé d'une partie du calcul et enfin, les coordonnées de la station de référence n'ont plus besoin d'être transmises (Neumann et al, 1996).

Enfin quelle que soit l'une ou l'autre des deux méthodes, la précision sur la détermination de la ligne de base vaut en théorie 1 cm + 1 ppm en planimétrie et est environ deux fois moins bonne en altimétrie (soit 2 cm + 1 ppm) si l'on se réfère à la documentation technique du système 1200 de Leica, ce matériel étant utilisé au cours de notre campagne. On trouvera sans doute dans la littérature des différences sur la valeur de la constante mais par contre tout le monde s'accorde sur une dégradation de la précision en fonction de la distance. Les erreurs géométriques ou atmosphériques ne s'éliminent plus aussi bien lorsque l'on réalise des longues lignes de base. Cette limitation importante justifie en partie l'émergence des concepts sur les réseaux temps réel à la fin des années 90, sans même parler de la notion de redondance en cas de panne apportée par les réseaux.

Le positionnement temps réel GPS en réseau : MAC et application

La densité de stations permanentes sur un même territoire incita très rapidement les spécialistes à proposer des solutions technologiques avancées. D'un point de vue économique, il fit peu de doutes qu'un marché existait compte tenu des gains de temps envisageables : le rattachement devient obsolète et ne mobilise plus ni récepteur ni opérateur supplémentaires. De plus, la disponibilité et la fiabilité augmentent proportionnellement au nombre de stations dans le réseau. Les constructeurs GPS en viennent donc rapidement à proposer de nouvelles solutions dans des rapports qualité/prix non envisageables avec des solutions classiques différentielles temps réel (sur le code ou la phase, respectivement le DGPS et le RTK). Alors que le temps réel classique fait intervenir deux récepteurs, un seul capteur suffit maintenant pour la détermination des points dans un réseau GPS temps réel. L'investissement matériel pour du DGPS réseau (NDGPS) permettant de se positionner avec une précision décimétrique ainsi que l'investissement matériel pour du RTK réseau (NRTK) permettant d'atteindre une précision centimétrique reste moindre par rapport à l'achat d'un couple de récepteurs, même s'il faut ajouter les abonnements et les communications à ces éventuels coûts d'équipement.

■ Les différentes solutions technologiques

Pour se positionner en temps réel à partir de plusieurs stations de référence, il faudrait pouvoir transmettre à un mobile les observations de plusieurs stations tout en conservant un court délai de transmission, ce qui n'est technologiquement pas possible. Et même si cela l'était, il resterait à déterminer quelles stations choisir et que faire des différentes corrections au mobile. Parmi de nombreuses solutions technologiques, les concepts FKP (paramètres de correction de surface)

(Fotopoulos and Cannon, 2001 ; Wübbena and Bagge, 2001) et VRS (station virtuelle de référence) (Vollath et al, 2000) vont s'imposer progressivement car ils dédient au serveur central une part importante des calculs à travers une algorithmie propriétaire non connue du récepteur mobile car non normalisée. La norme RTCM dans sa version 2.3 est peu adaptée mais rend malgré tout possible leur application. La nouvelle norme RTCM 3.1, mettant en œuvre le Concept Maître Auxiliaire (MAC), permet de diffuser au récepteur mobile les observations réalisées sur un sous-ensemble de 6 stations entourant l'utilisateur appelé "cellule" puis de laisser le récepteur mobile gérer de manière transparente sa stratégie de positionnement dans un contexte réseau. Ce concept est utilisé par le réseau Orphéon pour transmettre des données temps réel via le logiciel SpiderNET de Leica. La part du calcul se retrouve dans ce cas transférée à nouveau au mobile. En soi, le concept Maître Auxiliaire n'est donc pas directement comparable à VRS ou FKP mais doit s'accompagner de traitements supplémentaires (réalisés au mobile alors que ceux de FKP et VRS étaient essentiellement réalisés au serveur) comme c'est le cas pour la solution MAX de Leica que nous avons utilisée dans notre campagne.

Dans le cadre de notre campagne dans le réseau Orphéon qui utilise la norme RTCM version 3.1, il nous apparaît nécessaire de décrire plus en détail le concept Maître Auxiliaire et une de ses applications au niveau du mobile.

■ Le Concept Maître-Auxiliaire

Ce concept s'applique pour au moins 3 stations et plus généralement dans un sous-réseau du réseau complet (cf. figure 1) appelé cellule. Il reprend dans un premier temps les mêmes étapes que dans le cas de VRS et FKP.

• Rapatriement des observations des stations du réseau au serveur central

Simple à définir, cette étape n'en est pas moins la plus critique technologiquement parlant. Elle suppose que des observations soient réalisées sur des sites de qualité puis récupérées par le centre de contrôle via un réseau de télécommunication. Ces données doivent être transmises le plus

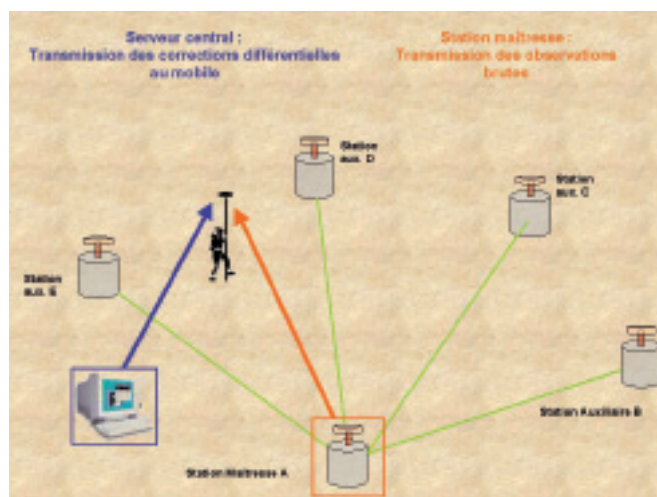


Figure 1. Concept Maître Auxiliaire.

rapidement possible au serveur de calcul, ceci 24h/24 et 7j/7. En effet, elles servent ensuite dans la résolution des ambiguïtés entières et la construction des corrections différentielles qui seront transmises au mobile sur le terrain. La latence finale, le temps entre l'instant des observations et l'utilisation des produits dérivés (corrections différentielles, observation de la station maîtresse) au niveau du mobile pour obtenir son positionnement, dépend du délai nécessaire à la transmission des observations au serveur de calcul et doit être la plus faible possible, inférieure à 1 seconde au maximum. Au-delà, les corrections ne sont plus valables pour être utilisées avec les observations présentes au mobile compte tenu des erreurs dispersives et non dispersives qu'elles modélisent. Le réseau de télécommunication joue donc un rôle primordial et la réalisation de cette étape nécessite notamment des transmissions haut débit par des réseaux télécom privés (Legros et al, 2005).

• Résolution des ambiguïtés au sein du réseau

Comme précédemment, la réalisation de cette étape est complexe car les distances inter-stations sont en général voisines de 60 à 70 km. Le logiciel de calcul du serveur central (GPSNet, GNSmart, SpiderNET...) doit résoudre en permanence les quantités $\Delta N_{AB}^{j,i}$, doubles différences d'ambiguïtés, pour toutes les stations et tous les satellites afin de pouvoir construire les corrections différentielles à l'étape suivante.

• Calcul des corrections différentielles

Comme toutes les stations du réseau sont connues dans la référence nationale, on peut calculer les corrections pour chacune d'entre elles en appliquant les équations établies dans la précédente partie.

A ce stade, les trois techniques vont procéder différemment et pour ce qui est de MAC, le logiciel va classer une station du réseau comme maîtresse (la plus proche du mobile par exemple) et les autres stations de la cellule comme auxiliaires. Dans les équations suivantes, nous appelons M la station maîtresse et A, B, deux stations auxiliaires de la cellule.

On peut alors construire toutes les corrections différentielles entre la station maîtresse et les stations auxiliaires : CD_{AM}^j , CD_{BM}^j (Ouaknine, 2007).

$$CD_{AM}^j = Corr\phi_M^j - Corr\phi_A^j$$

$$= [\lambda\phi_M^j - \rho_M^j - c(dt^j - dt_M) + \lambda N_M^j] - [\lambda\phi_A^j - \rho_A^j - c(dt^j - dt_A) + \lambda N_A^j] \quad (8)$$

$$= \lambda\Delta\phi_{AM}^j - \Delta\rho_{AM}^j + cdt_{AM} + \lambda\Delta N_{AM}^j$$

$$CD_{BM}^j = \lambda\Delta\phi_{BM}^j - \Delta\rho_{BM}^j + cdt_{BM} + \lambda\Delta N_{BM}^j \quad (9)$$

On remarque que pour calculer les corrections on retranche à la mesure de phase la distance géométrique, comme en RTK, mais également les décalages d'horloge et les ambiguïtés entières. Par conséquent, pour construire les corrections différentielles, tous les termes doivent être connus :

- $\Delta\phi_{AM}^j$ se calcule à partir des observations de phase,

- $\Delta\rho_{AM}^j$ se calcule à partir de la position connue des stations et des éphémérides des satellites,

- dt_{AM}^j est la différence des estimations de décalage d'horloge des récepteurs des deux stations,

- ΔN_{AM}^j peut s'obtenir à partir des ambiguïtés de double différence calculées à l'étape 2.

En effet, on peut remonter aux ambiguïtés de simple différence à partir des ambiguïtés de double différence par la relation suivante (Jaggi et al, 2001) :

$$\Delta N_{AM}^j = \Delta N_{AM}^{ref} - \Delta N_{AM}^{j,ref} \quad (10)$$

Le terme ΔN_{AM}^{ref} est choisi arbitrairement mais sera le même par rapport à tous les satellites. Il s'éliminera plus tard quand on réalisera les simples différences sur satellite.

Ces corrections différentielles seront établies pour tous les satellites et pour toutes les stations de la cellule. Cette étape correspond à ce que l'on nomme la mise à un niveau commun d'ambiguïté puisque toutes les ambiguïtés de double différence sont déterminées par rapport à une station maîtresse commune lors de la création des corrections différentielles.

• Transmission

Le serveur central va transmettre au mobile en format RTCM 3.1 l'ensemble des observations de la station maîtresse (messages RTCM 1003 et 1004) ainsi que les corrections différentielles de toutes les stations de la cellule par rapport à la station maîtresse (message RTCM 1017). La taille limitée des corrections différentielles rend possible cette transmission tout en respectant des temps de latence convenables. Le serveur transmet également les coordonnées de la station maîtresse (messages RTCM 1005 ou 1006) ainsi que les différences de coordonnées des stations auxiliaires par rapport à la station maîtresse (message RTCM 1014) via un serveur sur le réseau Internet. L'utilisateur doit donc se connecter depuis son récepteur mobile au réseau Internet, puis au serveur diffusant les données. La connexion au réseau Internet se fait en général par le biais d'un réseau de téléphonie mobile en utilisant le GPRS (General Packet Radio Service). Les données sont acheminées par paquets ce qui permet notamment une facturation au volume et non plus au temps passé. Comme cette technologie s'appuie sur les réseaux GSM traditionnels, la durée et la qualité de transmission dépendent de l'opérateur du réseau.

Au final, le récepteur dispose de toutes les informations pour remonter à un niveau d'ambiguïté près aux observations brutes de tous les récepteurs. Un des avantages de cette nouvelle norme MAC est donc de laisser le choix du traitement au mobile qui dispose de toutes les données pour mettre en œuvre différentes méthodes (interpolation par exemple).

• Interpolation des corrections différentielles

L'interpolation des corrections est une possibilité parmi d'autres sachant que l'on peut aussi bien travailler avec les observations quasi brutes et réaliser par exemple du multi ligne de base. Parmi toutes les possibilités d'interpolation, on peut citer l'interpolation poids/distance qui permet de calculer une correction différentielle entre le mobile et la station maîtresse.

$$CD_{\text{sat},M}^j = \frac{\sum_{k=1}^N \left(\frac{CD_{A,M}^j}{D_k} \right)}{\sum_{k=1}^N D_k} \quad (11)$$

Expression dans laquelle D_k est la distance entre le mobile et la station k et $CD_{A,M}^j$ est la correction différentielle entre la station maîtresse et la station auxiliaire k pour le satellite j . Cette correction sera ensuite traitée de la même manière qu'en mode RTK classique en réalisant des simples différences sur satellite. Pour les mêmes raisons que dans la partie précédente, cette différentiation sera similaire au final à une double différence et pourra ainsi faire l'objet des traitements de résolution classique. D'autres traitements plus complexes peuvent être mis en œuvre par les algorithmes des récepteurs en incluant par exemple des éléments statistiques sur l'ionosphère. C'est le cas de la technologie MAX que l'on retrouve dans les récepteurs 1200 de Leica que nous avons utilisés lors de notre campagne et que nous nommerons NRTK dans la suite (Euler et al, 2002).

Description de la procédure de tests en réseau temps réel

L'objectif principal de cette campagne est de comparer les résultats du positionnement temps réel cinématique (RTK) avec ceux du positionnement temps réel cinématique en réseau (NRTK) dans le cadre du réseau temps réel Orphéon. Notre but est d'informer les utilisateurs sur la réalité de l'opérationnalité du réseau, sur sa disponibilité, sa fiabilité, sa précision interne et sa précision de rattachement dans la référence nationale. Notre objectif n'est pas d'intercomparer les offres réseaux temps réel actuelles car bien d'autres critères que ceux énoncés précédemment entrent en ligne de compte : l'aspect économique, l'adéquation entre le réseau et les besoins de l'utilisateur notamment. Nous ne pouvons pas maîtriser ces aspects ni nous substituer à l'utilisateur mais par contre, nous pouvons informer sur les réalités du positionnement dans ces réseaux par rapport à un positionnement plus classique. Cette première campagne concerne un réseau particulier, pour une zone géographique donnée et sur deux jours d'observation. Nous prévoyons par conséquent de réitérer ces tests dans d'autres zones géographiques, à d'autres périodes de l'année et également pour les autres réseaux. Dans la construction des tests que nous décrivons ci-dessous, l'accent a été mis sur le caractère reproductible de cette campagne.

Les moyens mis en œuvre au cours de ces deux journées complètes d'observation furent 4 récepteurs Leica 1200 mis à disposition par Leica Geosystems, 2 splitters pour dupliquer les observations d'une antenne, 2 récepteurs Leica GPS500 pour le rattachement et 2 niveaux avec mires pour la mesure précise des hauteurs d'antenne. Pour des raisons pratiques, notre campagne s'est déroulée à l'Est de Chartres en bordure du réseau Orphéon actuel (cf. figure 2). Les observations ont mobilisé deux équipes de deux personnes les 31 juillet et 1^{er} août 2007 ainsi que deux véhicules de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT).

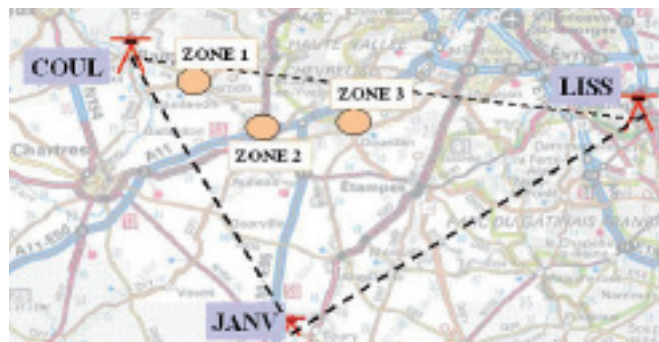


Figure 2. Localisation des zones de travail dans le réseau Orphéon.

■ Plusieurs zones

Afin de tester l'évolution de la qualité du positionnement en fonction de la distance à la station de référence la plus proche, nous avons sélectionné trois zones éloignées respectivement de 10 km, 20 km et 30 km de la station COUL (cf. figure 2). L'un de nos objectifs étant de comparer le RTK classique et le RTK réseau quant à leur aptitude à éliminer les erreurs géographiquement corrélées, nous avons choisi de faire du RTK classique avec de longues lignes de base, même si cela ne correspond pas toujours à son mode d'utilisation courant. Le nombre de zones à prendre en considération dépend de la distance inter-station du réseau lui-même si bien que dans le cas du réseau Orphéon (60 km en moyenne entre les stations) une quatrième zone à 40 km n'a pas de raison d'être puisque l'on se rapprocherait d'une autre station de référence. Par ailleurs, le choix des zones s'est fait autant que possible le long de la bissectrice du triangle formé par les trois stations entourant notre chantier (COUL, JANV et LISS). Bien que le calcul s'opère avec plus de trois stations (cf. figure 1), le triangle reste l'unité géométrique de base à prendre en compte.

■ Plusieurs points dans chaque zone

Afin de tester l'influence de l'environnement sur la qualité du positionnement, nous avons choisi plusieurs points dans chaque zone :

- 1 point rural : lieu dégagé sans masques,
- 2 ou 3 points semi-urbain : lieux avec des masques d'élévation moyens dans toutes les directions,
- 2 ou 3 points urbains : lieux avec au moins un masque total dans une direction (en pratique, ces points entourent l'église du village).

■ Réalisation des tests

La campagne s'est déroulée comme indiqué dans le tableau 1 pour les points sur les 3 zones. Pour chaque point, on a réalisé :

- un positionnement RTK classique à partir de la station COUL (RTCM 2.3),
- un positionnement NRTK (corrections MAX en RTCM 3.1).

Ces deux positionnements furent réalisés simultanément avec les mêmes observations en utilisant un splitter qui permet de connecter une même antenne sur deux récepteurs.

Dans le souci de limiter dans le temps la campagne afin de la rendre la plus reproductible possible, nous avons choisi de

Jour 1		9 h - 12 h	13 h - 15 h	15 h - 16 h 30	16 h 30 - 18 h
	Zone 1 (Equipe 1)	1 point rural (Z1R)	1 point semi-urbain (Z1SUf)	2 points semi-urbain (Z1SU1, Z1SU2)	2 points urbain (Z1U1, Z1U2)
	Zone 2 (Equipe 2)	1 point rural (Z2R)	1 point semi-urbain (Z2SUf)	2 points semi-urbain (Z2SU1, Z2SU2)	3 points urbain (Z2U1, Z2U2, Z2U3)
Jour 2		9 h - 12 h	13 h - 15 h	15 h - 16 h 30	16 h 30 - 18 h
	Zone 3 (Equipe 1)	1 point rural (Z3R)	1 point semi-urbain (Z3SUf)	2 points semi-urbain (Z3SU1, Z3SU2)	1 point urbain (Z3U1)
	Rattachements (Equipe 2)	Levé statique et statique rapide des points			

Tableau 1. Déroulement de la campagne.



réaliser sur un même point plusieurs sessions de mesures (10 minutes maximum) en coupant le récepteur entre chaque session.

Les longs créneaux horaires sur les points ruraux et le premier point semi-urbain permettent d'étudier l'influence des valeurs de DOP sur les deux modes de positionnement.

Enfin, pour pouvoir comparer les différentes zones et les différents milieux entre eux, les mesures des mêmes types de points sont réalisées aux mêmes moments entre les zones. Avant de mesurer le point suivant, la hauteur d'antenne est mesurée par nivellement de précision.

Ce tableau de marche permet également de libérer la seconde équipe le deuxième jour afin de réaliser les observations nécessaires aux calculs des rattachements dans la référence nationale.

Cette première campagne met en place une procédure de tests qu'il conviendra d'affiner au travers de futures expériences.

Coordonnées de référence des points

Pour disposer d'une position de référence pour l'ensemble des points de la campagne (cf. tableau 1), nous les avons rattachés en RGF93 en utilisant exclusivement les stations du RGP en post-traitement. Nous déterminons le point rural pour chaque zone en positionnement statique puis tous les autres points de la zone par positionnement statique rapide à partir du point rural précédemment déterminé. Tous ces autres points sont également déterminés par rapport aux stations RGP les plus proches afin de contrôler les coordonnées déterminées à partir du point rural.

Dans un premier temps, nous avons utilisé le logiciel SkiPro 3 de Leica pour réaliser ces traitements. Nous envisageons de faire également un calcul avec le logiciel Bernese pour valider ces résultats en utilisant les coordonnées ITRF des stations du RGP.

Le tableau 2 résume les résultats obtenus lors du rattachement du point rural de chaque zone à partir des stations du RGP.

Les écarts planimétriques et altimétriques du tableau 2 proviennent des résultats donnés par SkiPro 3, ils correspondent aux écarts à la moyenne pondérée (calculée à partir des écarts-types a posteriori sur les coordonnées).

Au vu de ces résultats, on peut dire que la précision planimétrique des points de la campagne dans le RGF93 est de l'ordre de 5 mm et que la précision altimétrique est de l'ordre de 1.3 cm. Ces résultats sont de très bonne qualité, voire optimistes en planimétrie, compte tenu de la précision actuelle du réseau RGP (1 à 2 cm) et montrent que le rattachement à la référence nationale se réalise très bien dans ce réseau même avec certaines lignes de base très longues.

Pour ce calcul, toutes les stations du RGP à proximité furent sélectionnées et on ne retrouve dans le tableau 2 que celles conservées. Les lignes de base depuis les stations SIRT (41 km) et LENE (82 km) ne furent pas résolues et les résultats altimétriques issues de FAVI et OUTA étaient systématiquement au-delà de 5 cm ce qui nous a contraints à les retirer.

A partir de ces points calculés en statique avec près de 3 h d'observation en moyenne, les autres points furent calculés en statique rapide. Nous n'avons conservé les points que dans la mesure où un calcul avec les stations du RGP venait contrôler les résultats en regard de la précision du statique

	Z1R (3h17min)			Z2R (2h41min)			Z3R (3h27min)		
	distance (km)	Ecart plani (cm)	Ecart alti (cm)	distance (km)	Ecart plani (cm)	Ecart alti (cm)	distance (km)	Ecart plani (cm)	Ecart alti (cm)
BRET	46,9	0,2	0,9	39,5	0,0	1,0	30,0	0,2	0,7
CHPH	21,0	0,4	2,6	22,9	0,3	1,3	32,9	0,1	1,8
MELN	73,7	0,4	0,3	64,9	0,7	0,3	54,2	0,7	0,5
VSFR	27,0	0,5	1,3	32,2	0,7	1,6	34,7	0,5	0,8

Tableau 2. Rattachement des points ruraux au RGF93 dans chaque zone.

ZONE 1										PLANIMETRIE				ALTIMETRIE			
POINTS	Durée	HDOP	VDOP	n (RTK)	n (NRTK)	N (RTK)	N (NRTK)	TTF (s) (RTK)	TTF (s) (NRTK)	RTK		NRTK		RTK		NRTK	
										Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)
Z1R	3h43	1,0	1,7	9281	9355	23	22	5	3	1,0	1,5	0,8	1,4	1,5	1,8	1,4	2,0
Z1SU1	1h52	1,2	2,1	5824	5803	15	13	2	2	0,9	1,2	0,9	1,5	0,8	0,8	1,0	1,2
Z1SU1	0h16	1,0	1,6	687	3	3	3	2	2	0,6	1,6	0,6	1,3	0,6	0,6	0,6	0,6
Z1SU2	0h13	1,0	1,4	316	294	2	2	8	4	0,9	2,0	0,3	2,2	0,9	3,7	0,2	2,9
Z1U1	0h10	2,4	3,9	206	345	2	4	136	51	0,7	0,8	0,4	0,9	0,5	0,5	1,7	2,5

Tableau 3. Résultats des positionnements RTK et NRTK en zone 1.

ZONE 2										PLANIMETRIE				ALTIMETRIE			
POINTS	Durée	HDOP	VDOP	n (RTK)	n (NRTK)	N (RTK)	N (NRTK)	TTF (s) (RTK)	TTF (s) (NRTK)	RTK		NRTK		RTK		NRTK	
										Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)
Z2R	3h06	1,0	1,7	4933	5105	20	22	7	8	1,0	1,8	0,8	1,4	1,5	2,4	1,3	2,3
Z2SU1	2h05	1,2	1,9	2246	1873	18	17	11	16	1,6	2,0	0,7	1,5	2,2	2,2	1,4	1,6
Z2SU1	0h13	1,1	1,7	374	177	2	3	9	6	0,7	1,6	0,9	2,3	0,8	3,7	1,1	1,8
Z2U1	0h11	3,3	3,8	575	287	3	1	76	117	3,1	5,5	2,1	4,1	4,7	5,0	3,2	3,6
Z2U3	0h07	2,0	2,3	402	408	1	2	7	12	1,7	20,0	0,9	20,8	0,7	5,8	0,7	52,7

Tableau 4. Résultats des positionnements RTK et NRTK en zone 2.

ZONE 3										PLANIMETRIE				ALTIMETRIE			
POINTS	Durée	HDOP	VDOP	n (RTK)	n (NRTK)	N (RTK)	N (NRTK)	TTF (s) (RTK)	TTF (s) (NRTK)	RTK		NRTK		RTK		NRTK	
										Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)	Ecart-type (cm)	EMQ (cm)
Z3R	2h53	1,0	1,6	9147	9124	17	18	0	0	0,7	1,3	0,7	1,3	1,1	2,5	0,8	2,0
Z3SU1	2h41	1,2	1,9	8270	8090	18	18	0	2	1,1	2,8	0,9	2,0	1,9	2,9	1,8	2,1
Z3SU1	0h10	3,3	3,4	572	975	2	3	128	50	1,6	3,4	1,3	2,4	1,5	2,4	0,9	3,1
Z3SU2	0h12	1,9	2,0	688	311	2	1	3	0	0,7	1,4	0,1	1,3	0,4	2,9	0,4	1,6
Z3U1	0h13	2,5	2,5	296	491	3	1	95	24	1,8	8,1	0,6	7,0	1,4	2,9	0,7	5,2

Tableau 5. Résultats des positionnements RTK et NRTK en zone 3.

rapide. Les coordonnées retenues pour la suite sont celles provenant du rattachement aux points ruraux.

Résultats des comparaisons RTK / NRTK

Les analyses suivantes s'appuient sur les tableaux 3, 4 et 5 qui résument les résultats respectivement pour les zones 1, 2 et 3. Pour chaque point, on trouve dans l'ordre la durée cumulée

des sessions, le HDOP et le VDOP moyen, le nombre de positions calculées en RTK et NRTK, le nombre de sessions en RTK et en NRTK, les temps d'initialisation en RTK et NRTK (Time To Fix en secondes), l'écart-type et l'EMQ en RTK et NRTK pour la planimétrie, l'écart-type et l'EMQ en RTK et NRTK pour l'altimétrie. Ces valeurs statistiques sont des moyennes calculées à partir de l'ensemble des positions calculées pour le point.

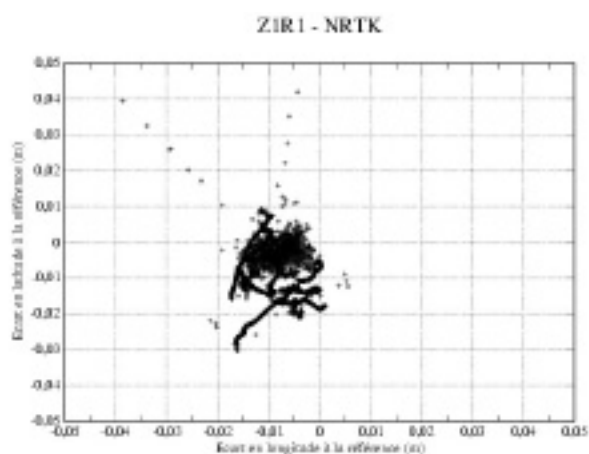


Figure 3. Ecart planimétriques du positionnement NRTK en zone 1 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP)

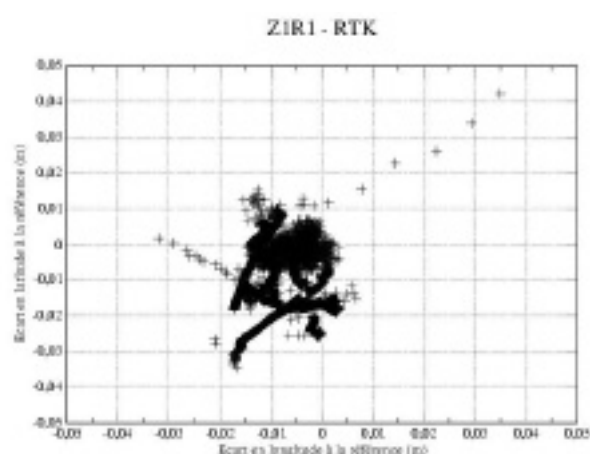


Figure 4. Ecart planimétriques du positionnement RTK en zone 1 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP)

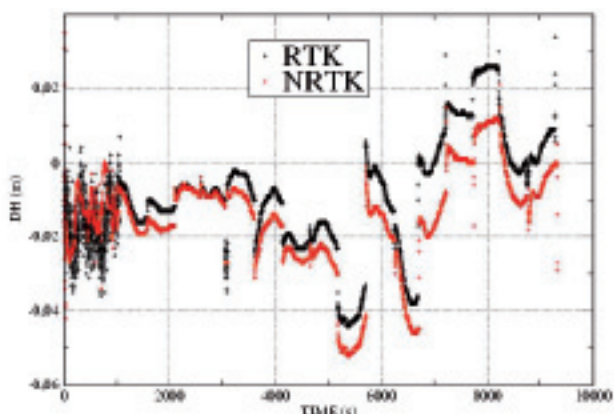


Figure 5. Écarts altimétriques des positionnements RTK et NRTK en zone 1 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP).



■ Etude de la répétitivité

L'objectif consiste à analyser la capacité de la stratégie de positionnement à retrouver la même position au cours du temps. Pour cela nous étudions les écarts-types de toutes les sessions ainsi que leurs moyennes au cours du temps (cf. tableaux 3, 4 et 5).

En planimétrie, on note que la répétitivité du NRTK est inférieure à 1 cm (0.7 cm en moyenne), quelle que soit la zone tant que les valeurs de DOP restent faibles (cf. figure 3). Dans le cas du RTK, les valeurs de répétitivité sont systématiquement légèrement supérieures pour toutes les sessions (1.1 cm en moyenne), (cf. figure 4).

En altimétrie, la répétitivité moyenne est proche de 1 cm en NRTK et de 1.1 cm en RTK (cf. figure 5). Comme pour la planimétrie les valeurs RTK sont à deux exceptions près supérieures à celles du NRTK et restent similaires quelle que soit la zone. On remarque logiquement une dégradation immédiate de ces valeurs lorsque les valeurs de DOP passent de 1 à 3.

■ Etude de la précision

Par l'examen des EMQ des tableaux 3, 4 et 5, on peut dire quelle a été lors de notre campagne la qualité du positionnement NRTK et RTK en RGF93 dans le réseau Orphéon. Ces EMQ se rapportent à la position de référence dont les calculs ont été présentés dans la précédente partie.

En planimétrie, la précision du positionnement NRTK Orphéon est en moyenne de 1.6 cm, variant entre 1.3 cm et 2.3 cm pour les sessions dont les valeurs de HDOP restent inférieures à 3 (cf. figures 3 et 6). En RTK, on retrouve une précision similaire avec toutefois des variations plus importantes pouvant atteindre presque 3 cm (cf. figure 7). On remarque pour la plupart des sessions des valeurs d'EMQ légèrement supérieures en RTK mais pas vraiment d'augmentation significative avec l'éloignement à la station de référence (COUL) si l'on compare notamment les figures 4 et 7. Sur les figures 4, 5, 6 et 7, on voit très clairement un décalage au Sud-Ouest du nuage de points des positions temps réel par rapport au point de référence. On retrouvera cette caractéristique pour tous les nuages de points

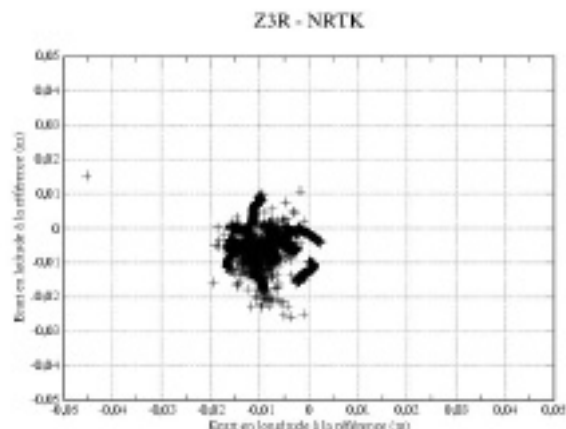


Figure 6. Écarts planimétriques du positionnement NRTK en zone 3 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP).

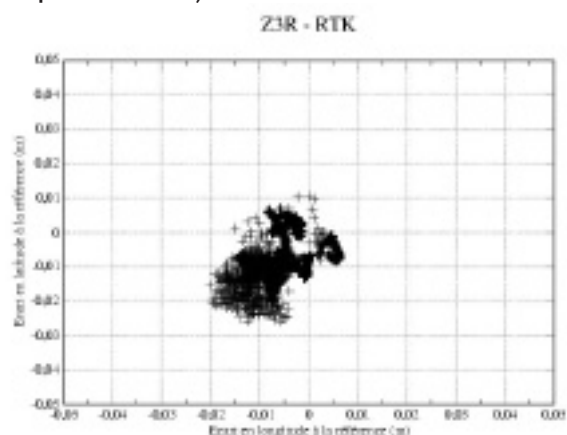


Figure 7. Écarts planimétriques du positionnement RTK en zone 3 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP).

avec un décalage de 1 à 2 cm, ce qui n'excède pas la précision planimétrique de nos points de référence.

En altimétrie, la précision du positionnement NRTK Orphéon est en moyenne de 1.9 cm variant entre 0.6 cm et 2.9 cm quelle que soit la zone pour les sessions dont les valeurs de HDOP restent inférieures à 3 (cf. figures 5 et 8). En RTK, on peut apporter les mêmes commentaires que pour la planimétrie, à savoir que la plupart du temps les valeurs des précisions sont légèrement supérieures au NRTK mais qu'on ne voit pas de dégradation nette en fonction de la zone.

Enfin, aussi bien en altimétrie qu'en planimétrie, on trouve deux sessions avec des précisions dégradées, supérieures à 5 cm (cf. tableaux 4 et 5), alors que les valeurs de DOP sont inférieures à 3. Ces sessions devront faire l'objet d'une étude plus approfondie mais on peut d'ores et déjà noter que cette dégradation de précision concerne aussi bien le NRTK que le RTK.

Pour conclure sur ces analyses de précisions interne et externe, on peut dire que lors de notre campagne de tests le NRTK s'avère un positionnement d'aussi bonne voire de meilleure qualité que le RTK classique, aussi bien en planimétrie qu'en altimétrie, avec une précision de l'ordre de 2 à 2.5 cm. On remarque que le positionnement RTK s'est avéré être aussi de très bonne qualité avec une très faible dégrada-

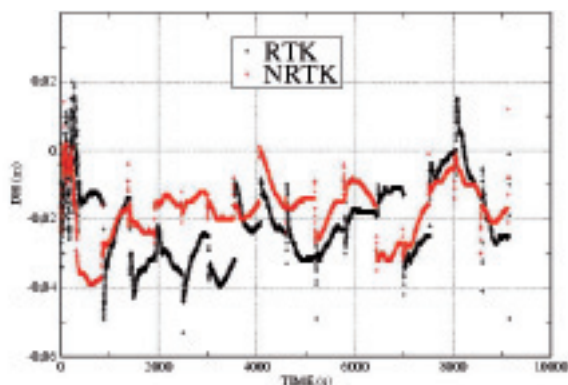


Figure 8. Écarts altimétriques des positionnements RTK et NRTK en zone 3 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP).

tion de sa qualité avec la distance. Les conditions atmosphériques idéales et constantes dans lesquelles nous avons travaillé expliquent sans aucun doute cette caractéristique d'autant plus que les récepteurs 1200 Leica utilisés modélisent par une méthode stochastique les résidus ionosphériques subsistant après différentiation. Cela montre que ces tests doivent être renouvelés régulièrement (dans des conditions moins favorables) et que l'intercomparaison des campagnes et des réseaux n'a pas vraiment de sens d'un point de vue précision sauf si cette intercomparaison pouvait être réalisée en permanence. A ce sujet, il est intéressant de noter qu'il est possible pour un opérateur réseau de proposer des cartes rafraîchies en temps réel permettant de donner les erreurs résiduelles existant en tout point du réseau, une autre méthode consistant à suivre en permanence la qualité du positionnement d'une station permanente ne servant pas dans l'élaboration de la solution réseau mais jouant le rôle de "mobile permanent".

■ Influence du milieu environnant et des facteurs de DOP

Dans les deux études précédentes, nous nous sommes essentiellement concentrés sur les résultats des deux premiers types de points : rural et semi-urbain, pour lesquels les valeurs de DOP se sont révélées être faibles. Dans cette partie, nous regardons plus particulièrement les points semi-urbains et urbains pour lesquels les valeurs de DOP sont plus élevées. Bien que l'on ne puisse pas lier uniquement le milieu environnant aux valeurs de DOP, il est inversement presque impossible de les décorréler. Dans cette étude, nous avons choisi au départ de nous mettre dans des cas réels en augmentant les masques et en les orientant différemment selon les points. Cette méthode ne se traduit pas toujours par une augmentation du DOP aux instants d'observation ce qui limite au final les analyses.

Sur les tableaux 3, 4 et 5, on constate que le HDOP et le VDOP influencent directement et significativement les répétitivités planimétriques et altimétriques ainsi que les précisions planimétriques et altimétriques dès lors qu'il dépasse 3, en NRTK aussi bien qu'en RTK. En deçà, les effets ne sont pas réellement significatifs. Il semble également que cette dégradation soit en général moins importante dans le cas du NRTK, en planimétrie et altimétrie. Toutefois cette conclusion mériterait des

tests complémentaires sur d'autres points masqués ou par simulation de masques.

■ Temps d'initialisation

Dans les tableaux 3, 4 et 5, on retrouve les temps de fixation des ambiguïtés (TTF : Time To Fix) en RTK et NRTK pour tous les points dans les trois zones. Ces valeurs ont été extraites des trames NMEA qui contiennent un code relatif au type de positionnement enregistré chaque seconde. Lorsque les valeurs de HDOP et VDOP sont inférieures à 2, les temps d'initialisation pour obtenir un positionnement RTK ou NRTK sont quasi instantanés quelle que soit la zone. Une légère dégradation de ce temps d'initialisation semble survenir en zone 2 mais elle ne se confirme pas du tout en zone 3. Par ailleurs, on n'observe pas de différence significative de ces temps d'initialisation entre le RTK et le NRTK.

Lorsque les valeurs de DOP augmentent, on constate une augmentation immédiate des temps d'initialisation. À l'exception d'un point, la fixation des ambiguïtés passe en moyenne de 10 s à 2 minutes en RTK et de 10 s à 1 minute en NRTK. Il semble donc que la durée d'initialisation est significativement plus courte en NRTK lorsque les valeurs de DOP augmentent. Comme pour la précédente partie, des études complémentaires seront nécessaires en développant notamment des tests systématiques avec des masques artificiels (variation de l'angle de coupure). Il serait également intéressant de tester des matériels différents pour étudier la dépendance entre temps d'initialisation et type de matériel.

■ Disponibilité du positionnement

Cette disponibilité dépend du bon fonctionnement de toute la chaîne, des observations GPS réalisées aux sites permanents jusqu'à l'utilisation des corrections différentielles au mobile pour déterminer la position du point. On a rappelé précédemment que la transmission des observations GPS au serveur central était assurée par un réseau télécom privatif, en particulier pour garantir une bonne latence finale. Ensuite, la transmission des corrections différentielles s'effectue par GPRS par l'intermédiaire des fournisseurs opérant sur les réseaux d'antennes GSM actuels. Actuellement, aucun de ces réseaux ne couvre totalement la métropole ce qui implique que certaines zones ne disposent pas de solutions réseaux temps réel.

Des analyses rapides basées sur les tableaux 3, 4 et 5 permettent d'affirmer que nous avons obtenu un positionnement NRTK dans 95 % des cas lorsque nous avons un positionnement RTK. L'analyse fine des trames NMEA a montré également que nous obtenions un positionnement NRTK dans 80 % des cas lorsque nous avons une position en mode absolu. Ces résultats sur la disponibilité s'appuient sur des milliers de positions enregistrées au cours de nombreuses sessions réparties sur plusieurs points et au cours de deux journées. Ils témoignent également de la bonne qualité de réception des données par GPRS dans la zone considérée. Des tests avec deux opérateurs de réseau GSM différents ont donné des résultats similaires dans cette zone.

Conclusion

Après avoir dans une première partie rappelé les principes et les équations du positionnement RTK simple, nous avons pu expliciter le fonctionnement du positionnement RTK réseau et plus particulièrement le concept Maître-Auxiliaire. Notre campagne d'observations a mis en œuvre ces deux modes de positionnement temps réel en comparant chacun d'eux à des positions de référence obtenues par positionnement statique. Le calcul des coordonnées de référence des points montre qu'on peut atteindre des précisions en dessous de 1 cm en planimétrie et de 1.3 cm en altimétrie dans la référence nationale RGF93 avec les stations du RGP les plus proches.

Nous avons ensuite montré que les répétitivités en RTK et NRTK étaient très similaires et de l'ordre de 1 cm en planimétrie et altimétrie, quel que soit l'éloignement à la station de référence COUL pour le RTK.

L'analyse des précisions par rapport aux coordonnées de référence montrent que la précision du NRTK dans le réseau Orphéon est en moyenne de 1.6 cm en planimétrie et 1.9 cm en altimétrie. Lorsque l'on compare à la précision du RTK, on constate des valeurs semblables avec une très légère dégradation lorsque l'on s'éloigne de la station de référence COUL. Cette très bonne qualité du positionnement RTK, même à plus de 40 km, s'explique par les bonnes conditions météorologiques d'une part et par la faible activité ionosphérique d'autre part. En effet, il est important de noter que dans le cycle d'activité solaire de 11 ans, principal responsable du contenu électronique de l'ionosphère, nous étions au mois d'août 2007 dans la période de plus faible activité. Il sera donc très intéressant de renouveler ce type d'étude dans le temps pour observer si le RTK conserve d'aussi bons résultats que le NRTK en période d'activité ionosphérique plus intense.

Pour les temps d'initialisation, ils apparaissent quasiment identiques et de l'ordre d'une dizaine de secondes aussi bien pour le RTK que le NRTK. Enfin nous n'avons pas noté de difficulté de disponibilité de la position NRTK. De plus le positionnement NRTK présente une tolérance aux pannes car si une station tombe en panne, les autres prennent le relais. Toutefois il convient de rappeler que nos résultats ont été obtenus dans une zone bien couverte par les réseaux de téléphonie mobile (GPRS) ce qui peut parfois ne pas être le cas. Nous reproduirons ce même type d'étude à la fois pour les autres réseaux et dans le temps. Cette première campagne constitue pour nous un point de départ, nous ferons évoluer nos tests afin de mieux rendre compte du milieu environnant et des dégradations des valeurs de DOP en particulier. ●

Remerciements

Nous remercions chaleureusement Rani El Meouche et Omar Kokoch pour leur participation à la campagne d'observations. Nous remercions la société Leica Geosystems pour leur prêt de 4 récepteurs GPS 1200 et plus particulièrement Farouk Kadded, responsable support technique, pour ses commentaires éclairés sur notre étude.

Nous remercions la société Geodata Diffusion pour la prise en charge des connections et des communications au réseau

Orphéon et plus particulièrement Romain Legros pour son aide précieuse.

Nous remercions Aurélie Maurisset, Agnès Paris, Er Rachid Boulamain, Sofiane Rekhis (anciens étudiants de l'ESGT) pour avoir consacré leur projet de troisième année à une première campagne de test et avoir ainsi permis une première réflexion sur le sujet.

Contacts

Laurent MOREL

ESGT - Laboratoire de Géodésie et Géomatique (L2G)
laurent.morel@esgt.cnam.fr

Stéphane DURAND

ESGT - Laboratoire de Géodésie et Géomatique (L2G)
stephane.durand@esgt.cnam.fr

Bibliographie

Euler H.-J., Zebhauser B. E., 2002. *Comparison of different proposals for reference station network information distribution formats*. ION GPS 2002.

Fotopoulos and Cannon, 2001. *An overview of Multi-Reference station method for cm-level positioning*. GPS Solutions, Vol. 4, No 3, pp 1-10.

Jäggi A., Beutler G., Hugentobler U., 2001. *Using double difference information from network solution to generate observations for a virtual GPS reference receiver*. IAG 2001 scientific assembly.

Legros R., Molle F., Balard N. *Le point sur les traitements de données GNSS en réseau pour un positionnement centimétrique temps réel de meilleure qualité*. XYZ 105, 2005.

Leick A., 2004. *Satellite Surveying*. 3rd Edition.

Neumann J. N., VanDierendonck K. J., Manz A., Ford T. J., 1996. *Real time carrier phase positioning using the RTCM standard message types 20/21 and 18/19*. Novatel Inc., Technical papers.

Ouaknine J. C., 2007. *Développement d'un logiciel de traitement de GNSS en réseau*. Mémoire de TFE ESGT.

Vollath U., Buecherl A., Landau H., Pagels C., Wagner B., 2000. *Multi-base RTK positioning using virtual reference stations*. ION GPS 2000.

Wübbena and Bagge, 2002. *RTCM type 59-FKP for transmission of FKP*. GEO++ White Paper Nr. 2002.01.

ABSTRACT

Key words: RTK, Network RTK, Orpheon, MAC

Several Real Time GNSS networks pursue their development in France, in order to provide new GNSS positioning services. Using classical RTK principles with a single station, this article explains the Master Auxiliary Concept involved in the new RTCM standard in its 3rd version. Then, we present the results of a campaign using these methods for differential positioning: classical RTK positioning and network RTK positioning using the Orpheon's network. In order to compare classical RTK and network RTK positioning, distance to the reference station used for classical RTK positioning has been changed, the same data for both processings have been used, and several surroundings areas (rural, semi-urban and urban) are considered. We also compared RTK positions to RGF93 positions obtained by post-processing. Main results show a positioning accuracy of network RTK mode at least as good as classical RTK mode, and of about 2 cm. Initialization times (in order to obtain a fixed position) are also similar and close to 10 seconds on average.

La mesure de l'exactitude d'un récepteur GPS

■ Charles DEBOUCHE - Katia BERGHMANS - Jean-Jacques CLAUSTRIAUX

Une méthode est proposée pour déterminer l'exactitude d'un récepteur GPS. Cette exactitude comprend la justesse du récepteur (absence d'erreur systématique) et sa précision (effet des erreurs accidentelles inévitables). Cette méthode consiste à utiliser le récepteur GPS pour effectuer, à différentes dates, la mesure des coordonnées de quelques stations de coordonnées connues. Les écarts entre les coordonnées ainsi mesurées et les coordonnées "connues" de ces stations sont soumis à une analyse de la variance à deux critères de classification. Celle-ci permet de vérifier si les erreurs accidentelles sont ou non indépendantes des dates et des stations de mesure. Les résultats de cette analyse de la variance permettent donc d'évaluer la précision du récepteur. Ils permettent également d'en tester la justesse.

MOTS-CLÉS

Récepteur GPS, exactitude, justesse, précision, analyse de la variance.

Il y a plusieurs termes différents pour décrire l'écart qui existe entre la valeur du mesurande (ou valeur de référence reconnue comme vraie) et le résultat du mesurage. Ces termes sont normalisés par les normes ISO 5725-1 (1994) sous le titre "Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure", ISO 7078 (1985) sous le titre "Construction immobilière – Procédés pour l'implantation, le mesurage et la topométrie – Vocabulaire et notes explicatives" et par CEN (1999) sous le titre "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure".

Les deux premières références définissent l'exactitude comme étant l'écart entre le résultat d'un essai (d'un mesurage) et la valeur du mesurande. Cette exactitude implique une combinaison de composantes aléatoires et systématiques. La dernière référence (CEN, 1999) définit l'incertitude comme étant un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande. Exactitude et incertitude comprennent donc toutes deux le doute qui existe quant à la valeur à donner au mesurande, tant du fait des erreurs accidentelles que des erreurs systématiques, en supposant qu'il n'y a pas eu de faute dans le mesurage. Le mot "incertitude" est parfois réservé au paramètre qui quantifie l'exactitude, ou plutôt l'inexactitude du mesurage.

Exactitude et incertitude sont donc à considérer comme synonymes et traitant globalement des erreurs tant systématiques qu'accidentelles, ainsi que des fautes éventuelles qui altèrent le résultat d'un mesurage. L'erreur totale est également synonyme de l'exactitude et de l'incertitude, dans la mesure où elle est définie comme l'ensemble de l'erreur d'un mesurage constitué par la combinaison de l'erreur aléatoire et de l'erreur systématique (ISO 7078, 1985).

La justesse est définie comme étant l'écart entre la valeur moyenne obtenue à partir d'une large série de

résultats d'essais et une valeur de référence acceptée (ISO 5725-1, 1994). La justesse est donc tributaire de la présence d'une faute éventuelle et/ou d'une erreur systématique éventuelle. Un mesurage est donc réputé "juste" s'il est dépourvu de faute et d'erreur systématique.

Finalement la précision (également appelée la fidélité) d'un mesurage est l'écart entre les valeurs mesurées obtenues en appliquant la procédure de mesurage plusieurs fois, dans des conditions prescrites (ISO 7078, 1985). Elle quantifie l'importance des valeurs des erreurs accidentelles inévitables qui altèrent le résultat de ce mesurage. La précision est donc indépendante de la justesse. Un appareil peut être très précis sans être juste s'il fournit des résultats de mesurage entachés d'erreurs systématiques. La précision est quantifiée par l'écart-type des erreurs accidentelles. La figure n°1 illustre ces deux notions de justesse et de précision.

L'exactitude (ou l'incertitude) comprend donc tant la justesse que la précision d'un mesurage.

Il existe diverses sources d'inexactitude possible, affectant la justesse et la précision du positionnement obtenu par l'usage d'un système mondial de positionnement par satellites (GPS ou GNSS). Elles peuvent être dues aux satellites, au milieu traversé, à l'environnement du récepteur et au récepteur lui-même (Bonin 2001, Kasser, 2001, Duquenne et

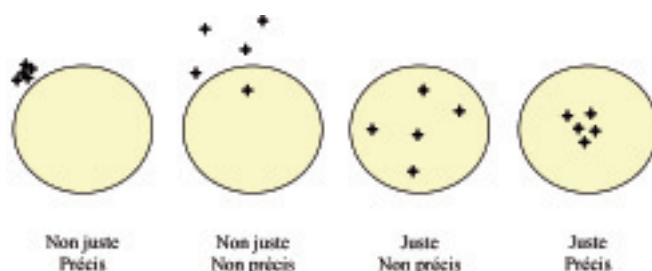


Figure 1. Illustration des notions de justesse et de précision.

al. 2005). Elles sont donc susceptibles de varier dans le temps et dans l'espace.

Le mesurage des coordonnées d'un point par un récepteur GPS livre à l'utilisateur des valeurs de ces coordonnées sans lui permettre d'en évaluer l'exactitude. Bien évidemment, le paramétrage du récepteur permet généralement d'imposer une valeur limite de la précision des coordonnées mesurées, généralement exprimée en écart-type, au-dessus de laquelle les coordonnées ne sont pas livrées par le récepteur. Il s'agit cependant d'un processus non vérifiable par l'utilisateur et qui ne traite que de la précision et non de la justesse du résultat du mesurage.

Il est ici proposé une méthode relativement simple d'évaluation de l'exactitude d'un récepteur GPS. Ce dernier est utilisé à différentes dates et sur des points de coordonnées connues par ailleurs. Une analyse de la variance est appliquée aux résultats de ces mesurages et permet d'estimer l'exactitude du récepteur.

Matériel et méthode

Un récepteur GPS de précision centimétrique est utilisé en mode RTK, recevant des corrections en temps réel par gsm émises par le système Walcors. Celui-ci est un réseau permanent de stations de référence couvrant le territoire de la Wallonie (Belgique) et appartenant à la Région wallonne (Walcors, 2007).

Cinq stations sont levées à trois dates différentes de manière à faire varier la constellation des satellites c'est-à-dire à des jours et à des heures différentes. Chaque station est un point géodésique, positionné et entretenu par l'Institut Géographique National belge. Les coordonnées de ces points sont disponibles sur le réseau internet (IGN, 2007). L'écart-type quantifiant la précision des coordonnées de ces points géodésiques est compris entre 8 et 17 mm (Lambot, 2005).

Les coordonnées x, y et z seront donc mesurées sur ces cinq stations et à trois dates avec le récepteur GNSS dont on souhaite évaluer l'exactitude. Pour chaque station et chaque date, le mesurage des coordonnées de la station est répété à trois reprises, avec extinction du récepteur entre chaque répétition. Les différences entre les résultats de ces mesurages et les coordonnées connues des stations seront traitées par une analyse de la variance à deux critères de classification selon le modèle croisé aléatoire (Dagnelie 2006, § 10.3). Nous considérons que les stations sont choisies au hasard et sont représentatives de toutes les stations sur lesquelles le récepteur évalué est susceptible d'être utilisé. Il en est de même pour les dates de mesure. L'utilisation de l'analyse de la variance suppose que les erreurs accidentelles ont des distributions de probabilité normales et de variances identiques.

Le modèle mathématique du résultat d'un mesurage particularisé à la mesure d'une coordonnée x à la i^è date et sur la j^è station peut s'écrire :

$$X_{ijk} = m_{x_j} + F_{ijk} + s + A_{ijk} \quad (1)$$

où X_{ijk} est la variable aléatoire représentant toutes les coordonnées en x qui pourraient être mesurées par le récepteur GPS,

i est l'indice de la date. Il varie de 1 à p et p = 3 dans notre expérience,

j est l'indice de la station. Il varie de 1 à q et q = 5 dans notre expérience,

k est l'indice de la répétition. Il varie de 1 à n et n = 3 dans notre expérience, pour toutes valeurs de i et de j,

m_{x_j} est la moyenne théorique de la coordonnée en x, c'est-à-dire la vraie valeur de cette coordonnée en x,

F_{ijk} est la variable aléatoire représentant toutes les fautes qui pourraient éventuellement être commises,

s est une erreur systématique éventuelle, identique pour toutes les mesures de coordonnées en x,

A_{ijk} est la variable aléatoire représentant l'erreur accidentelle globale résultant de toutes les erreurs accidentelles possibles.

L'écart qui existe entre X_{ijk} et la moyenne théorique de la coordonnée en x est appelé l'incertitude ou l'exactitude :

$$Exactitude = F_{ijk} + s + A_{ijk} \quad (2)$$

Le même modèle peut évidemment s'écrire pour les coordonnées y et z.

La précision du mesurage est fonction de la dispersion de l'erreur accidentelle A, mesurée par l'écart-type de la distribution de probabilité de l'erreur accidentelle σ_A .

Les fautes proviennent d'une inattention, d'une maladresse ou d'un oubli de l'opérateur dans le mesurage ou dans les calculs appliqués au résultat du mesurage. Généralement la faute est d'un ordre de grandeur largement supérieur à l'erreur.

La justesse est fonction des valeurs de F et de s. Un mesurage est "juste" en l'absence de faute et d'erreur systématique, donc si F et s sont nulles.

L'absence de faute a été testée sur l'ensemble des 45 différences entre coordonnées mesurées et valeurs connues par un test de Grubbs (Grubbs, 1969, Stefansky, 1972, ISO 5725-2, 1994).

On suppose à ce stade que l'on peut remplacer la moyenne théorique de la coordonnée en x par la coordonnée de référence fournie par l'IGN (Belgique). Ces hypothèses permettent de réécrire le modèle mathématique de la manière suivante, en présentant l'écart entre la coordonnée en x fournie par le récepteur et la coordonnée en x supposée connue exactement de la station :

$$\Delta X_{ijk} = X_{ijk} - (x_j)_{ref} = s + A_{ijk} \quad (3)$$

Comme énoncé ci-dessus, l'erreur accidentelle A_{ijk} résulte de plusieurs composantes qui peuvent varier dans le temps et dans l'espace. On peut donc décomposer ces erreurs accidentelles de la manière suivante :

$$A_{ijk} = D_i + S_j + DS_{ij} + R_{ijk} \quad (4)$$

où D_i est la composante de l'erreur accidentelle liée à la date,
 S_j est la composante de l'erreur accidentelle liée à la station,

DS_{ij} est la composante de l'erreur accidentelle liée à l'interaction existant entre l'effet de la date et celui de la station,

R_{ijk} comprend toutes les composantes de l'erreur accidentelle qui ne sont liées ni à la date ni à la station.

Les valeurs observées de ces écarts sont soumises à l'analyse de la variance à deux critères de classification à savoir le critère date et le critère station.

Cette analyse de la variance permet, tout d'abord, de tester les trois hypothèses suivantes :

$$H_0 : \sigma_D^2 = 0, H'_0 : \sigma_S^2 = 0 \text{ et } H''_0 : \sigma_{DS}^2 = 0 \quad (5)$$

où σ_D^2 est la variance de la composante de l'erreur accidentelle liée à la date,

σ_S^2 est la variance de la composante de l'erreur accidentelle liée à la station,

σ_{DS}^2 est la variance de la composante de l'erreur accidentelle liée à l'interaction existant entre l'effet de la date et celui de la station.

Si ces hypothèses sont acceptées, cela signifie que les composantes correspondantes de l'erreur accidentelle peuvent être considérées comme nulles.

Dans le cas contraire, l'évaluation de la précision du récepteur devra évidemment tenir compte des composantes qui sont considérées comme différentes de zéro.

Si la première hypothèse (H_0) est rejetée, cela signifie que la précision du récepteur est moins bonne si on la définit pour une date quelconque que si on la quantifie pour une date unique. Il en est de même pour la deuxième hypothèse, en ce qui concerne les stations.

Le rejet de la troisième hypothèse signifie que la composante de l'erreur accidentelle liée à la date ne sera pas la même d'une station à l'autre ou que celle qui est liée à la station, ne sera pas identique d'une date à l'autre. Il faudra évidemment en tenir compte dans l'estimation de la précision du récepteur.

A partir de la somme de la variance résiduelle et des variances énoncées ci-dessus qui ne pourraient être considérées comme nulles, on pourra procéder à l'estimation de la précision du récepteur par la formule :

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\hat{\sigma}_D^2 + \max[0; (\hat{\sigma}_S^2 - \hat{\sigma}_{ref}^2)] + \hat{\sigma}_{DS}^2 + \hat{\sigma}_R^2} \quad (6)$$

où $\hat{\sigma}_D^2$ est la valeur estimée de la variance de la composante de l'erreur accidentelle liée à la date, si celle-ci doit être considérée comme différente de zéro,

$\hat{\sigma}_S^2$ est la valeur estimée de la variance de la composante de l'erreur accidentelle liée à la station, si celle-ci doit être considérée comme différente de zéro,

Sources de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés des écarts	Carrés moyens	F
Dates	p - 1	SCE _D	CM _D	$F_D = CM_D / CM_{DS}$
Stations	q - 1	SCE _S	CM _S	$F_S = CM_S / CM_{DS}$
Dates-stations	(p - 1)(q - 1)	SCE _{DS}	CM _{DS}	$F_{DS} = CM_{DS} / CM_R$
Résidus	pq(n - 1)	SCE _R	CM _R	
Total	pqn - 1	SCE _T		

Tableau 1. Tableau de l'analyse de la variance

$\hat{\sigma}_{ref}^2$ est la variance caractérisant la précision des coordonnées de référence,

$\hat{\sigma}_{DS}^2$ est la valeur estimée de la variance de la composante de l'erreur accidentelle liée à l'interaction existant entre l'effet de la date et celui de la station si celle-ci doit être considérée comme différente de zéro,

$\hat{\sigma}_R^2$ est la valeur estimée de la variance de la composante résiduelle de l'erreur accidentelle.

Ces valeurs estimées des composantes de variance sont obtenues à partir des résultats de l'analyse de la variance, selon les expressions suivantes.

$$\hat{\sigma}_D^2 = \frac{CM_D - CM_{DS}}{n \cdot q} \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_S^2 = \frac{CM_S - CM_{DS}}{n \cdot p} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_{DS}^2 = \frac{CM_{DS} - CM_R}{n} \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}_R^2 = CM_R \quad (10)$$

où les termes CM sont les carrés moyens, c'est une expression propre du langage de l'analyse de variance désignant la variance. Ces CM_D, CM_S, CM_{DS} et CM_R sont respectivement les carrés moyens des facteurs date et station, le carré moyen de l'interaction entre ces deux facteurs et le carré moyen résiduel, extraits du tableau d'analyse de variance¹ (tableau 1).

A noter que les valeurs F de SNEDECOR relatives aux tests de signification des effets "dates" et "stations" sont obtenues en divisant le carré moyen correspondant par celui de l'interaction.

Les écarts-types en y et en z s'obtiennent de la même manière en procédant à l'analyse de la variance des écarts en y et en z, entre les coordonnées mesurées et les coordonnées correspondantes de référence.

Il reste à évaluer la justesse du récepteur, c'est-à-dire sa capacité à fournir des coordonnées dépourvues d'erreur systématique. Cela revient à tester la nullité de la moyenne des

(1) Les tableaux les plus courants comprennent dans leurs utilitaires le calcul de l'analyse de la variance. Il convient cependant de vérifier le bon calcul des valeurs de F.

écarts constatés entre les coordonnées mesurées par le récepteur et les coordonnées de référence, considérées comme connues et justes, des stations utilisées dans les mesurages. Les coordonnées de référence sont considérées comme exactes si elles sont mesurées avec une précision largement supérieure à la précision du récepteur en question. Il n'en est évidemment pas ainsi dans notre expérience puisque l'écart-type caractérisant leur estimation par l'IGN est de l'ordre du centimètre, soit du même ordre de grandeur que la précision présumée des coordonnées livrées par le récepteur. Elles ne peuvent donc évidemment pas être considérées comme exactes, c'est-à-dire connues sans erreur d'aucune sorte. La justesse des coordonnées mesurées ne peut être testée dans ce cas. On peut cependant examiner si ces coordonnées mesurées diffèrent significativement des coordonnées de référence. Pour ce faire, on procède à un test d'égalité entre les coordonnées mesurées et les coordonnées de référence en calculant la moyenne des écarts entre les coordonnées en x mesurées et les coordonnées en x de référence par la formule :

$$\bar{\Delta}_x = \frac{1}{npq} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n [x_{ijk} - (x_i)_{ref}] \quad (11)$$

Le récepteur pourra être considéré comme juste si la moyenne des écarts entre les coordonnées mesurées et les coordonnées de référence est nulle, ce qui correspond à poser comme hypothèse à tester :

$$H_0 : m_{\Delta x} = 0 \quad (12)$$

Nous vérifions ainsi que le récepteur donne des coordonnées qui ne diffèrent pas significativement des coordonnées de référence calculées par l'IGN.

Un test de conformité de la moyenne des différences peut répondre à cette question. Il se réalise en calculant la valeur :

$$t_{obs} = \frac{|\bar{\Delta}_x|}{\sqrt{\hat{\sigma}_{\Delta x}^2}} \quad (13)$$

qui est une valeur observée de la variable t de Student dont le nombre de degrés de liberté dépend des composantes de variances dont la signification a été mise en évidence par l'analyse de la variance. Les nombres de degrés de liberté correspondants aux diverses situations (Cochran, 1951) sont présentés dans le tableau 2.

La variance de la moyenne des différences peut se calculer par l'expression :

$$\hat{\sigma}_{\Delta x}^2 = \frac{\hat{\sigma}_D^2}{p} + \frac{\hat{\sigma}_S^2}{q} + \frac{\hat{\sigma}_{DS}^2}{pq} + \frac{\hat{\sigma}_R^2}{pqn} \quad (14)$$

En tenant compte des composantes de variance des coordonnées mesurées par le récepteur, dans la mesure où elles sont considérées comme différentes de zéro, et de la variance des coordonnées de référence, cette variance peut se calculer plus simplement à partir des carrés moyens du tableau d'analyse de variance par les expressions présentées au tableau 2. L'hypothèse de justesse du récepteur est rejetée si la probabilité d'observer une valeur de la variable t de Student supérieure à t_{obs} est inférieure au niveau de signification choisi pour ce test et qui est habituellement de 5 %.

Composantes de variances non nulles	$\hat{\sigma}_{\Delta x}^2$	Nombres de degrés de liberté
σ_D^2	$\frac{CM_D}{pqn}$	p - 1
σ_S^2	$\frac{CM_S}{pqn}$	q - 1
σ_{DS}^2	$\frac{CM_{DS}}{pqn}$	(p-1)(q-1)
σ_D^2 et σ_S^2	$\frac{CM_D + CM_S - CM_{DS}}{pqn}$	$\frac{(CM_D + CM_S - CM_{DS})^2}{\frac{CD_D^2}{(p-1)} + \frac{CD_S^2}{(q-1)} - \frac{CD_{DS}^2}{(p-1)(q-1)}}$
σ_D^2 et σ_{DS}^2	$\frac{CM_D}{pqn}$	(p-1)
σ_S^2 et σ_{DS}^2	$\frac{CM_S}{pqn}$	(q-1)
σ_D^2 , σ_S^2 et σ_{DS}^2	$\frac{CM_D + CM_S - CM_{DS}}{pqn}$	$\frac{(CM_D + CM_S - CM_{DS})^2}{\frac{CD_D^2}{(p-1)} + \frac{CD_S^2}{(q-1)} - \frac{CD_{DS}^2}{(p-1)(q-1)}}$

Tableau 2. Nombres de degrés de liberté de la variable t de Student en fonction des composantes de variance à considérer comme différentes de zéro (le résultat de la fraction doit être arrondi à l'unité supérieure).

Le rejet de cette hypothèse implique donc la présomption de l'existence d'une erreur systématique dans les coordonnées fournies par ce récepteur, dont la valeur peut être estimée à $\bar{\Delta}_x$.

Résultats

Mesures

Les mesurages ont été effectués les 18 et 31 juillet et le 17 août 2007. La distance maximale séparant deux des cinq stations est de 7.555 km. Les distances séparant les cinq stations des trois stations de référence du système Walcors les plus proches varient respectivement entre 11 et 17 km, 12 et 17 km et 32 et 38 km.

Paramètre	Δx	Δy	Δz
Minimum (cm)	-1,5	-7,7	-5,9
Maximum (cm)	3,8	5,2	8,6
Moyenne (cm)	1,08	0,08	0,34
Ecart-type estimé (cm)	1,26	3,03	4,35
Grubbs (minimum)	2,041	2,569	1,436
Grubbs (maximum)	2,159	1,692	1,901

Tableau 3. Paramètres descriptifs résumant les 45 écarts calculés entre les coordonnées mesurées par GPS et les coordonnées de référence (trois dates x cinq stations x trois répétitions) et valeurs du test de Grubbs.

Source de variation	Degrés de liberté	Carrés moyens	F _{obs}	Probabilité
Analyse de variance des écarts en x				
Dates	2	0.600889	0,2780	0,7643
Stations	4	10.195222	4,7162	0,0300
Dates-stations	8	2.161722	6,0011	0,0001
Résidus	30	0.360222		
Analyse de variance des écarts en y				
Dates	2	1.238222	0,2182	0,8086
Stations	4	74.855000	13,1938	0,0013
Dates-stations	8	5.673500	3,0365	0,0127
Résidus	30	1.868444		
Analyse de variance des écarts en z				
Dates	2	4.820667	0,4336	0,6626
Stations	4	156.985333	14,1187	0,0011
Dates-stations	8	11.119000	3,1917	0,0097
Résidus	30	3.483778		

Tableau 4. Analyses de variance des écarts en x, en y et en z, entre coordonnées mesurées et coordonnées de référence.

Le tableau n° 3 présente les paramètres descriptifs résumant les 45 écarts calculés entre les coordonnées mesurées par GPS et les coordonnées de référence (trois dates x cinq stations x trois répétitions). Dans les deux dernières lignes de ce tableau sont présentées les valeurs de la statistique de Grubbs relative à la détection de fautes éventuelles. Ces valeurs étant inférieures à la valeur limite de cette statistique (approximativement 3,09 avec un niveau de signification de 5 %), on peut en conclure qu'il n'y a pas eu de faute dans ce mesurage.

■ Précision

Le tableau 4 présente les résultats des analyses de variance pratiquées sur les écarts en x, en y et en z, entre coordonnées mesurées et coordonnées de référence (exprimés en cm). La composante de variance associée au facteur date n'est pas significativement différente de zéro pour les trois coordonnées (probabilité supérieure au niveau de signification choisi, soit 0,05). Par contre, les composantes de variance associées

	x	y	z
$\hat{\sigma}_s^2$ (cm ²)	0.89	7.69	16.21
$\hat{\sigma}_{GN}^2$ (cm ²)	1.56	1.56	1.56
Max {0 ; ($\hat{\sigma}_s^2 - \hat{\sigma}_{GN}^2$)}	0.00	6.12	14.64
$\hat{\sigma}_{DS}^2$ (cm ²)	0,60	1.27	2.55
$\hat{\sigma}_R^2$ (cm ²)	0.36	1.87	3.48
$\hat{\sigma}_X^2$ (cm ²)	0.96	9.26	20.67
$\hat{\sigma}_X$ (cm)	1.0	3.0	4.5

Tableau 5. Composantes de variance et précision du récepteur GPS utilisé.

Moyenne des écarts (cm)	1,08	0.08	0,34
Variance estimée de la moyenne des écarts (cm ²)	0.2266	1.6634	3.4886
t _{obs}	2.26	0.06	0.18
Nombre de degrés de liberté	4	4	4
Probabilité t _{obs}	0.0867	0.9548	0.8644

Tableau 6. Évaluation de la justesse du récepteur GPS

au facteur station et à l'interaction entre les stations et les dates sont significativement différentes de zéro (probabilité inférieure au niveau de signification choisi, soit 0,05). Les erreurs de mesurage semblent donc indépendantes de la date de mesure. Elles varient par contre d'une station à l'autre et ces variations ne sont pas stables dans le temps.

A partir de ces résultats, on peut calculer les composantes de variances non nulles ainsi que l'écart-type caractérisant la précision du récepteur GPS utilisé. Ces résultats sont présentés dans le tableau 5. La variance caractérisant les erreurs d'estimation des coordonnées de référence a été calculée en considérant un écart-type moyen de 0,0125 m.

On peut donc déduire de ce tableau que la précision du récepteur GPS utilisé est quantifiée par des valeurs de l'écart-type de 1,0, 3,0 et 4,5 cm, respectivement en x, y et z.

■ Justesse

Le tableau 6 présente le test de conformité vérifiant la justesse du récepteur GPS utilisé.

Les probabilités d'observer ces valeurs de t_{obs} étant supérieures au niveau de signification choisi (0,05), on peut considérer que la moyenne des écarts existant entre les coordonnées mesurées par le récepteur GPS utilisé et les coordonnées de référence est nulle tant en x qu'en y et en z. On peut donc en conclure que ce récepteur livre des coordonnées qui sont en moyenne égales aux coordonnées de référence. Pratiquement cela revient à considérer ce récepteur comme étant juste.

Conclusions

La répétition du mesurage par un récepteur GNSS, à trois dates différentes, sur cinq stations de référence de coordonnées fournies par l'IGN et à trois reprises indépendantes a permis de quantifier la précision de ce récepteur et d'en valider la justesse. Il résulte de ces mesures, traitées par une analyse de variance, que ce récepteur peut être considéré comme juste et caractérisé par une précision, exprimée en écart-type, de 1,0, 3,0 et 4,5 cm, respectivement en x, y et z. ●

Contacts

Charles DEBOUCHE – Katia BERGHMANS –

Jean-Jacques CLAUSTRIAUX

Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux,
Passage des Déportés, 2 à 5030 Gembloux - Belgique
debouche.c@fsagx.ac.be

Bibliographie

BONIN G. (2001). *Système GPS de positionnement par satellite*. Les Techniques de l'Ingénieur (réf. du 12/9/2006). Disponible sur World Wide Web : <http://www.techniques-ingenieur.fr/affichage/DisplIntro.asp?nGcmId=te6715>

CEN - COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION (1999). *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. AFNOR : NF ENV 13005, 105 p.

COCHRAN W.G. (1951). *Testing a linear relation among variances*. Biometrics 7, 17-32.

DAGNELIE P. (2006). *Statistique théorique et appliquée*. Tome 2 : Inférence statistique à une et à deux dimensions. Paris et Bruxelles : De Boeck & Larcier. 734 p.

DUQUENNE F., BOTTON S., PEYRET F., BÉTAILLE D. et WILLISP. (2005). *GPS : Localisation et navigation par satellite*. Paris Lavoisier, 330 p.

GRUBBS F. E. (1969). *Procedure for detecting outlying observations in samples*. Technometrics, 14, 1-21.

IGN (2007). *Points planimétriques et altimétriques* (réf. du 13/9/2007). Disponible sur World Wide Web : <http://www.ign.be/FR/FR1-7.shtm>

ISO 5725-1 (1994). *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 1 : Principes généraux et définitions*.

ISO 5725-2 (1994). *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée*.

ISO 7078 (1985). *Construction immobilière - Procédés pour l'implantation, le mesurage et la topométrie - Vocabulaire et notes explicatives*.

KASSER M. (2001). *Le GPS : utilisation en positionnement et surveillance*. Les Techniques de l'Ingénieur, (réf. du 12/9/2006). Disponible sur World Wide Web : <http://www.techniques-ingenieur.fr/affichage/DisplIntro.asp?nGcmId=r1384>

LAMBOT P. (2005). *BeRef & Projection Lambert Liège - Techniques de positionnement* 1/10/2005, 11 p.

STEFANSKY W. (1972). *Rejecting outliers in factorial designs*. Technometrics, 14, 469-479.

Walcors (2007). *Réseau permanent de stations GPS de référence*. (réf. du 13/9/2007).

Disponible sur World Wide Web : <http://gps.wallonie.be/>

ABSTRACT

Key words: GPS receiver, accuracy, trueness, precision, analysis of variance (ANOVA).

A method is proposed to determine the accuracy of a GPS receiver. This accuracy consists of the trueness of the receiver (absence of systematic error) and its precision (effect of unavoidable accidental errors).

This method consists in using the GPS receiver to perform, at different dates, the measurement of coordinates of some stations of known coordinates. The discrepancies between the coordinates measured and the "known" coordinates of these stations are submitted to an two-way analysis of variance.

This one permits to verify if accidental errors are or not independant of the dates and stations of measurement. The results of this analysis of variance allow to value the precision of the receiver therefore. They also allow to test its trueness.

Olivier Reis

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

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

Reinhart Stölzel

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

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

Paul Newby

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

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

Des topographes traducteurs à votre service

Évaluation de l'érosion sur la côte atlantique argentine : Zone Necochea-Quequén

■ Paula M. TRISTÁN - Jorge H. DOORN - Ruben S. WAINSCENKER - José F. ZELASCO

■ MOTS-CLÉS

Érosion, télédétection, images satellites, photographies aériennes, planification urbaine.

L'érosion côtière est un phénomène naturel qui peut devenir un problème lorsque dans son aire d'influence se trouvent des zones urbaines.

Souvent, par manque de connaissance des processus naturels qui régissent les côtes, les interventions des communautés perturbent

ou modifient de manière directe ou indirecte les écosystèmes côtiers. Par conséquent les zones côtières sont des environnements complexes dont le développement est conditionné par de nombreuses variables. Ce travail présente les résultats les plus importants, d'une étude qui porte sur un tronçon côtier de 30 km de long, dans le département de Necochea, au sud-est de la province de Buenos Aires en Argentine. Une composante essentielle de cette étude a été constituée par les travaux de relevés et de mesures des zones d'érosion, à partir de l'analyse et de la comparaison des images aériennes et satellites de la zone prises entre 1960 et aujourd'hui, ainsi que par les mesures effectuées sur le terrain. L'évolution de la côte a été reconstituée avec précision en intégrant toutes les images disponibles dans des images de travail consolidées. Ces images ont été reconstituées en ayant recours à des procédés divers, parmi lesquels se trouvent la géoréférenciation, la correction des aberrations, et les algorithmes visuels.

L'érosion côtière définie comme le processus de perte de matière qui affecte la frange littorale [1] est le phénomène analysé dans cette étude. L'érosion marine est provoquée par des formes complexes d'actions mécaniques (vagues et courants), chimiques et biologiques. En premier lieu interviennent deux formes d'actions mécaniques : le flux et le contreflux. En second lieu interviennent les actions chimiques. L'eau marine contient divers sels dissous qui lui confèrent une activité chimique notable [2].

En zone continentale, l'érosion est également le fruit d'actions mécaniques, thermiques, chimiques, et biologiques. Les actions mécaniques sont le résultat des vents produisant l'énergie qui détache le matériel non consolidé et creuse la matière. L'érosion est également le résultat de la fluctuation des

températures qui provoque la contraction et la dilatation de la roche. Par ailleurs, tout comme en milieu marin ou continental des agents chimiques dissolvent la matière. Enfin les actions biologiques peuvent intervenir comme agent renforçant, ou perforant la matière, la rendant plus vulnérable aux actions des autres agents érosifs.

L'objectif de ce travail est de déterminer l'ampleur de l'érosion dans la zone considérée en utilisant les images satellites, la cartographie, et les photos aériennes et en comparant ces sources avec les résultats obtenus lors de travaux réalisés sur le terrain, en procédant de la même manière que pour d'autres études similaires [3], [4], [5], [14]. L'information ainsi recueillie permettra aux personnes et organismes responsables, de prendre des décisions fondées sur une connaissance appropriée du comportement de la

côte, et de développer une planification urbaine, économique touristique adaptée pour la région.

Dans la section 2 nous décrivons les différents types d'informations utilisées dans cette étude et pour chacun nous précisons les données qui ont été réunies. Dans la section 3 nous présentons la zone étudiée, ses caractéristiques historiques, géographiques et morphologiques. La section 4 présente les résultats des mesures, obtenues dans chacun des secteurs, détaillant en particulier leur érosion maximum, érosion minimum et leur taux d'érosion. Enfin dans la section 5 nous présentons l'analyse des résultats et les conclusions de l'étude.

Zone étudiée

La ville de Necochea se trouve en Argentine, au sud-est de la province de Buenos Aires. Elle fait partie avec ses villes voisines d'une des plus importantes zones de tourisme balnéaire de la côte atlantique argentine. De ce fait, des questions telles que l'érosion des côtes affectent significativement le développement économique des villes de la région.

Dans cette zone de nombreux facteurs d'érosion s'associent, qui ont sur elle une influence directe et indirecte. Ce grand système est affecté par les actions anthropiques telles que la construction de brise-lames, la fixation des dunes, le gravelage des rues, l'urbanisation de zones, etc. La conséquence de ces actions est que certaines zones, généralement situées au nord de l'influence anthropique souffrent de déséquilibres dans leurs dynamiques et provoquent des conflits qui souvent produisent des pertes ou accumulations de matériel. [7].

Sources d'informations

Pour réaliser l'analyse de l'érosion dans la zone étudiée nous avons rassemblé les documents suivants :

■ Photographies aériennes

La photographie aérienne est l'une des sources qui s'est avérée la plus utile pour calculer les taux d'érosion côtière. En effet celle-ci permet de couvrir une longue période temporelle tout en présentant une résolution spatiale satisfaisante. Dans cette étude nous avons utilisé des clichés pris lors de vols effectués sur une période de 35 ans. Les premiers clichés datent de 1960, les suivants de 1967, 1984 et 1994.

■ Images satellites

Nous disposons d'images satellites à périodicité rapprochée. Cependant la résolution spatiale de celles-ci, initialement faible, limite considérablement la possibilité de les utiliser pour la détection de l'évolution de la ligne côtière. Les images utilisées pour ce travail correspondent à des capteurs différents avec des résolutions spatiales différentes. L'image satellite la plus ancienne dont nous disposons est une image Landsat datant de 1976 avec une résolution de 60 m. Nous disposons également d'images prises avec ce même capteur en 1984. A partir de 1999, de façon continue, des images ont été produites avec une résolution de 15 m. La dernière image que nous avons obtenue a été prise par Quickbird et possède une résolution spatiale de 0,62 m.

■ Cartographie

La cartographie est le document qui nous offre la meilleure couverture historique, mais l'échelle à laquelle ces documents historiques sont disponibles nous permet uniquement d'observer les changements substantiels et d'établir des tendances générales. Ils ne permettent pas de réaliser des mesures précises. La cartographie de la zone date de 1960 et il n'existe pas dans cette zone de relevé plus récent.

La figure 1 présente un résumé par ordre chronologique de tout le matériel rassemblé pour l'étude.

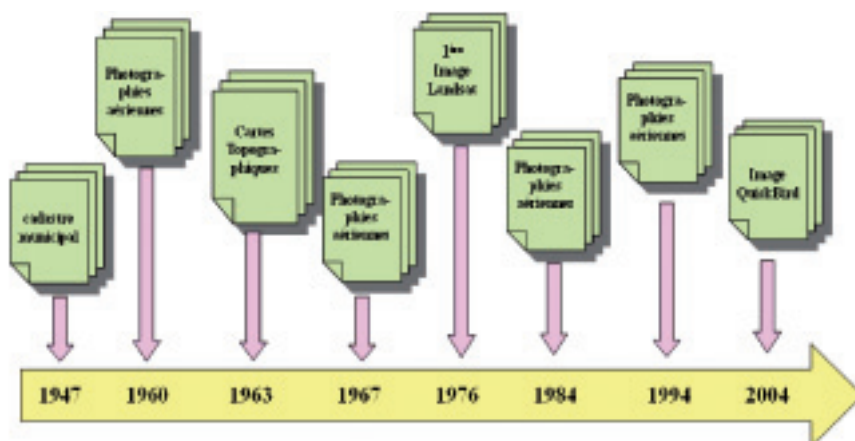


Figure 1. Chronogramme détaillant par type et par date les informations obtenues.

Secteurs analysés

La zone côtière qui s'étend sur 30 km et qui nous intéresse a été divisée en 5 secteurs afin de procéder à son analyse (Figure 2). La définition de la zone et sa division en secteurs a été orientée par deux préoccupations du gouvernement de Necochea. La première était d'obtenir des mesures réelles dans des secteurs où, du fait de l'urbanisation, l'érosion et ses progrès deviennent des sources de conflits dans la communauté. La seconde était d'obtenir des informations générales qui permettent d'évaluer le phénomène et d'en déterminer les causes.

Le secteur 1, "Costa Bonita"⁽¹⁾, se situe à l'extrémité Est du département de Necochea, à la limite avec celui de Lobería. Dans cette zone se trouve un site touristique qui a connu un grand succès dans les années 70. Il comporte des hébergements, commerces et autres établissements qui fonctionnent

principalement pendant la période estivale. Pour ce secteur nous disposons d'images de 1967, 1984 et 2004. Il existe donc une période de 20 ans durant laquelle aucune information n'a été enregistrée.

Le secteur 2 "Bahía de los Vientos"⁽²⁾ est l'un des lieux où l'on peut observer les changements les plus importants sur la ligne des falaises. Dans cette zone le travail de terrain a mis en évidence l'ampleur de l'érosion. Les plaintes de la population y sont plus nombreuses et mettent en cause le brisalamas au sud du port de Quequén. Même si cela n'a pas été prouvé, on lui attribue un impact direct sur l'érosion des falaises. Ce secteur est l'un des mieux documentés puisque nous disposons d'images de 1967, 1984, 1994 et de 2004.

Pour le secteur 3, "Barrio Médano"⁽³⁾ proche de la ville balnéaire de Necochea, nous détenons également



Figure 2. Image satellite qui présente les secteurs sélectionnés et étudiés.

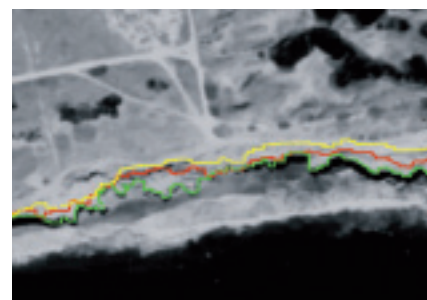


Figure 3. Photographie aérienne de Bahía de los Vientos, prise en 1967. On y a superposé les lignes des photographies de 1983 et de 1994.

des clichés des années 1967, 1984, 1994 et 2004. La structure de ce secteur a été profondément altérée, puisque dans la décennie des années 90, une partie des dunes a été éliminée au profit de la construction d'une zone urbaine privée.

En revanche, dans la zone 4 de "Medano Blanco"⁽⁴⁾, seuls des clichés des années 1967 et 1994 existent et ont pu être comparés. L'étude de ceux-ci montre que sur tout le tronçon analysé, ce secteur a été très peu affecté par l'érosion, même si l'information dont nous disposons est insuffisante pour pouvoir l'affirmer.

Pour le cinquième et dernier secteur étudié, "Punta Negra"⁽⁵⁾, on dispose d'images de 1967, 1983 et de 2004. Les autres prises de vues aériennes de la côte ne sont pas arrivées jusqu'à cette zone.

Mesures et résultats

La méthodologie utilisée pour calculer la ligne de la côte, et en conséquence le taux d'érosion, fait appel à plusieurs types de travaux. D'abord on doit rassembler à une échelle commune toutes les données qui proviennent des différentes sources, afin de pouvoir les comparer. Pour cela on doit sélectionner la projection adaptée dans chaque cas. L'enregistrement des images requiert des points de contrôle ou des bornes de référence. Après l'enregistrement, on procède à l'identification de la ligne de la côte pour chacune des images disponibles, grâce à des techniques standard de traitement numérique, telles que l'analyse de l'éclat et du contraste, l'élimination du bruit, et la détection des bords, entre autres [8], [9], [12], [13]. Différents types de pré-traitement et de traitement ont été utilisés en fonction

des caractéristiques propres de l'image. Pour certaines il a été nécessaire d'employer des algorithmes d'expansion de contraste et d'éclat, pour d'autres images il a fallu éliminer le bruit, causé par la dégradation des images, ainsi que par le processus de numérisation. Pour d'autres images on a utilisé un algorithme simple de détection de bords, sans avoir recours à des tâches de pré-traitement. Des traitements analogues d'images ont été réalisés pour les autres secteurs étudiés le long de la côte. Sur la photographie aérienne prise en 1967, on a superposé les lignes extraites des images postérieures selon chaque cas [10], [11]. Ceci a permis d'observer la progression du phénomène et finalement, de quantifier l'érosion. Dans chaque cas, l'image de plus basse résolution détermine la précision des valeurs obtenues.

Il est nécessaire de préciser qu'il existe pour la zone étudiée, des intervalles où la ligne de falaise n'a pas pu être extraite ni soulignée de manière continue. Pour ces intervalles il n'a pas été possible de comparer les bords des différentes images et par conséquent d'évaluer l'érosion.

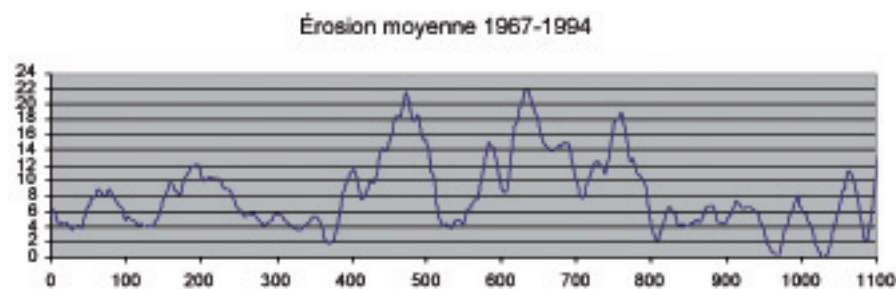
Des travaux de terrains ont été réalisés dans le secteur de Bahía de los Vientos. Des points de contrôle ont été identifiés et la distance entre ces points et la ligne de la côte a été mesurée. Des mesures

ultérieures ont permis d'évaluer in situ l'évolution de l'érosion. On a pu observer des zones qui souffriront un effondrement de plusieurs mètres à court terme, à cause de l'effet gryère qui affecte les constituants des sols. On a mesuré également des structures en béton et métalliques exposées qui avaient une érosion moindre. Même si ces valeurs étaient en deçà des valeurs obtenues grâce aux images, dans certains cas elles étaient très proches.

La Figure 3 montre la variation que la ligne de la falaise a subie dans la zone de Bahía de los Vientos.

Sur le graphique 1, ci-dessous, on peut observer des pics d'érosion maximum de 22 mètres pendant une période de 27 ans, dans le secteur de Bahía de los Vientos (Figure 3).

Le tableau 1, page suivante, présente le résumé des mesures de l'érosion maximum qui correspondent aux secteurs analysés. Comme le montre le tableau, le secteur de Barrio Médano⁽³⁾ ne présente quasiment pas d'évolution entre 1984 et 1994. Après cette date et d'après les mesures, il n'y a pas eu de processus d'érosion ou, à cause de la résolution des images employées, celui-ci n'a pas pu être repéré. De même le secteur de



Graphique 1. Érosion moyenne calculée grâce à la méthode des caisses mobiles. L'axe X montre le point analysé et l'axe Y mesure en mètres l'érosion du point.

(1) Côte Mignonne – (2) Baie des Vents
(3) Quartier Dune – (4) Dune Blanche
(5) Pointe Noire

ENDROIT	Erosion 1967 – 1984	Erosion 1967 – 1994	Erosion 1967 – 2004
Costa Bonita	18.3 m	Non mesurée	18.3 m
Bahía de los Vientos	19.5 m	23 m	30.6 m
Barrio Médano	11.5 m	14.4 m	14.4 m
Médano Blanco	1.9 m	1.9 m	1.9 m

Tableau 1. Résumé des érosions maximums mesurées au large de la côte.

Médano Blanco⁽⁴⁾ n'a connu qu'une faible érosion entre 1984 et 1994, avant que le phénomène ne devienne pratiquement nul sur les dix années suivantes. Cela s'explique probablement par le fait que ces zones sont formées principalement par des dunes et des bancs de sable. Ces formations se déplacent, au fur et à mesure des années, indépendamment d'un éventuel processus d'érosion. Les valeurs trouvées de variation de la ligne masquent donc l'érosion puisqu'elles ne sont pas uniquement le résultat du processus.

On peut observer sur le graphique 2, que le processus d'érosion à Costa Bonita a été considérable pendant la période allant de 1967 à 1984. Après cette période la vitesse d'érosion a fortement diminué. Ceci démontre un changement important du comportement de la côte.

Pour la zone de Bahía de los Vientos, la période d'érosion maximum se situe entre 1967 et 1984. La période suivante, qui va de 1984 à 1994, n'a pas présenté de taux d'érosion significatif. Finalement, pendant la dernière période, on a pu observer une nouvelle croissance du taux d'érosion. Même si cette étude ne poursuit pas l'analyse de la corrélation entre la construction du

brise-lames et le processus d'érosion, il est important de préciser que sa construction s'est faite en trois temps. On a fini de construire le premier tronçon en 1922. Ensuite en 1952 on l'a prolongé de 1192 mètres. Et en 2006, on y a rajouté 400 mètres [6].

La zone de Punta Negra a eu un comportement quasiment linéaire. Le processus érosif a présenté un taux constant pendant toute la période étudiée. Cependant il faut préciser que pour cette zone on détient des informations de trois dates différentes. Il existe une période de 20 ans pour laquelle nous ne disposons d'aucune donnée intermédiaire.

On appelle caisses mobiles le rectangle virtuel qui contient le fragment de côte, pour lequel on évalue l'érosion. Quand la direction de la côte est Nord-Sud ou Est-Ouest le résultat est égal aux moyennes mobiles. La valeur de l'érosion obtenue est égale au quotient entre la surface limitée par les deux courbes et la largeur sélectionnée pour le calcul. Les moyennes maximums, générales (moyenne) et minimums (graphique 3) correspondent à une largeur de 18, 12, 5 pixels respectivement. Le graphique 3 présente des valeurs d'érosion obtenues par les calculs

d'aires avec les méthodes des caisses mobiles.

Conclusions et perspectives

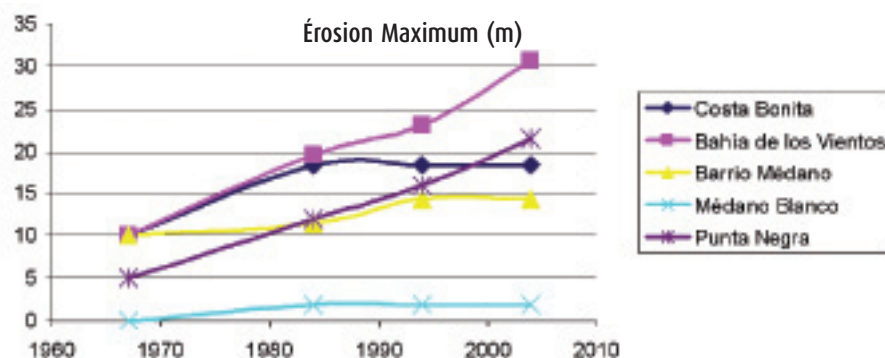
Pour certaines images nous avons eu recours à la combinaison de plusieurs techniques de pré-traitement et de traitement d'images. Cette méthode répond au besoin de numériser certaines photographies aériennes. Elle fait face également à un problème de bruit dû à la dégradation des images.

Dans les secteurs de falaises, les techniques utilisées ont permis de détecter la ligne de la côte, alors que dans les zones d'intervalles de dunes et de plages cela a été plus compliqué. D'après ces analyses on peut conclure que l'érosion n'est pas uniforme tout le long de la côte. Elle est présente de manière considérable par intervalles localisés, et pour chaque intervalle elle présente différents taux. Le taux d'érosion le plus significatif se situe sur la côte du village de Quequén, en particulier dans le secteur appelé Bahía de los Vientos. Sur un tronçon de ce secteur on a mesuré une érosion maximum de 30,6 mètres pour une période de 67 ans. Le taux d'érosion y est donc de 83 cm par an, approximativement.

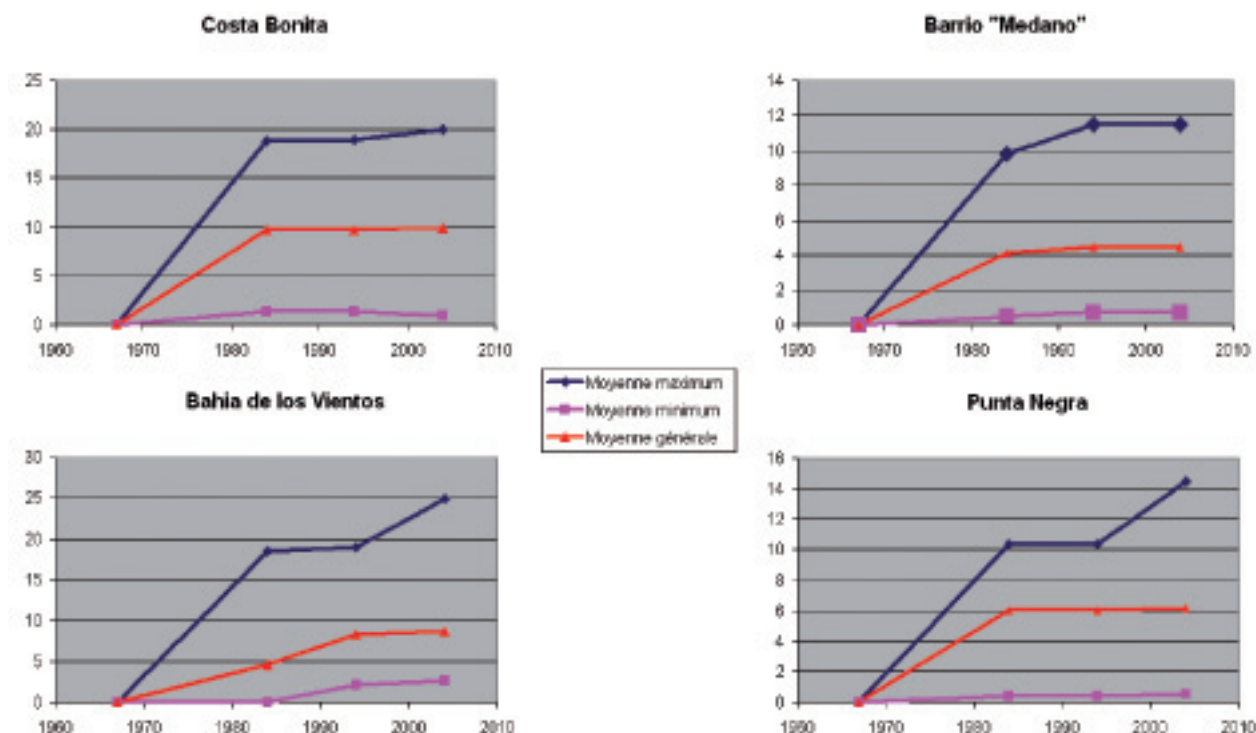
Les travaux réalisés ont permis de situer des points de référence grâce auxquels il est possible de mesurer directement la distance au bord de la mer avec une grande précision. Ceci permettra de suivre de plus près le processus d'érosion et permettra d'émettre des hypothèses sur les causes de l'érosion. On considère déjà que la mise en œuvre d'un brise-lames situé sur le port de Quequén a une grande influence sur ce phénomène. Ce travail fournit donc des éléments utiles pour une étude de ces hypothèses. ●

Références et bibliographie

- [1] J. Zújar. "Métodos para el Cálculo de la Erosión Costera. Revisión, Tendencias y Propuesta". Departamento de Geografía y Física y AGR. Univ. de Sevilla. Juin 2001.
- [2] G. Molina Fávero. "La reestructuración de un espacio: refuncionalización en la zona del frente marítimo de la ciudad de



Graphique 2. Montre le comportement de l'érosion des points maximums au fil du temps. L'axe des abscisses représente le temps en années et l'ordonnée l'érosion maximum en mètres.



Graphique 3 : présente l'érosion maximum, minimum et la moyenne. Les lignes montrent le développement du processus d'érosion.

Necochea". Facultad de Humanidades, Univ. Nacional de Mar del Plata, 2004.

[3] S. Aubié & J. P. Tastet. "Coastal Erosion, Processes and Rates: An historical Study of the Gironde Coastlines, Southwestern France". Journal of Coastal Research. Vol 16, No.3.

[4] G. Bo, S. Dellepiane, R. De Laurentiis. "Coastline extraction in Remotely Sensed Images by means of Texture Features Analysis". International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), v 3, 2001.

[5] S. Dellepiane, R. De Laurentis & F. Giordano. "Coastline extraction from SAR images and method for the evaluation of the coastline precision" Pattern Recognition Letters, Volume 25.

[6] M. Goicoechea "Remodelación y Prolongación de la Escollera Sur: Informe de Avance". Consorcio de Gestión de Puerto Quequen, Informe de Avance 2005.

[7] F. Isla, L. Teruggi, M. Farenga. "Dinámica Eólica de la costa del Parque Miguel Lillo y repoblamiento de Bahía de los Vientos, Partido de Necochea". Centro de Geología de Costas y del Cuaternario. Univ. Nacional de Mar del Plata, 1993.

[8] A. Jain. "Fundamentals of Digital Image Processing". Ed. Prentice Hall Inc. New Jersey 1989.

[9] J. R. Jensen. "Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective". 2th Edition Prentice Hall, New Jersey, 1996.

[10] C. Pinilla. "Elementos de

Teledetección". Ra-Ma., Madrid, 1995.

[11] T. M. Lillesand & R. W. Kiefer. "Remote Sensing and Image Interpretation". 3th Edition John Wiley & Sons Inc., New York, 1994.

[12] C. R. González & R. Woods. "Digital Image Processing". Addison Wesley Publishing Co. Massachussets, 1992.

[13] K. R. Castleman. "Digital Image Processing". Ed. Prentice Hall, New Jersey, 1996.

[14] P. Zuzek, R. Nairn & S. Thieme. "Spatial and Temporal Considerations for Calculating Shoreline Change Rates in Great Lakes Basin". Journal of Coastal Research Special Issue # 38. 2003.

Contacts

Paula M. TRISTÁN - Jorge H. DOORN

Ruben S. WAINSCHEKER

Faculté des Sciences exactes, UNCPBA, Tandil (7000), Buenos Aires, Argentine.

ptristan@exa.unicen.edu.ar

jdoorn@exa.unicen.edu.ar

rffw@exa.unicen.edu.ar

José F. ZELASCO

Faculté des Sciences exactes, UNCPBA - Faculté d'Ingénieur, Univ. de Buenos Aires - Faculté des Sciences Exactes et Technologie UCALP

jfzelasco@exa.unicen.edu.ar

ABSTRACT

Key words: Erosion, satellite images, aerial photographs, urban planning.

Coastal erosion is a natural phenomenon that can turn into a hardship when there are urban neighbourhoods in the area. Lack of knowledge of processes which regulate the coastline evolution may frequently make community leaders take actions which may alter, in a way or other, the coastline ecosystem. Consequently, coastline areas become complex scenarios due to the number of variables conditioning their evolution. This paper reports the most important data collected alongshore thirty kilometres in Necochea county, located in the southeast region of Buenos Aires Province. The data was collected by means of indirect measurement using aerial and satellite images from 1960 up to the present as well as direct field measurements. The evolution of the coastline was precisely rebuilt integrating every source images in a single composed working image for each coastline segment studied. Integrated images were constructed coordinating a large variety of algorithms such as georeferentiation, aberration corrections and visualization techniques.

Guidage et commande de machines de chantier

De l'implantation statique à celle cinématique

■ Werner STEMPFHUBER - Hilmar INGENSAND - traduction : François GIGON, Florence VAUDAN

MOTS-CLÉS

Contrôle et commande de machines de chantier, capteurs de mesures 3D, construction

La problématique du guidage et de la commande de machines de chantier doit être considérée et comprise comme un domaine de l'ingénierie géodésique

précisément de la navigation. Les tâches requises, telles que l'acquisition et la vérification des données, l'élaboration des données planimétriques ainsi que le calcul des paramètres de navigation, sont exécutées en rapport avec les disciplines spécifiques de la fabrication de machines, de la cybernétique et le personnel qualifié de la construction. Par conséquent, le spectre tout entier des techniques de mesures géodésiques va y être utilisé. De plus, la compréhension géométrique entre la trajectoire 3D et les informations complémentaires correspondantes (orientation de la machine, pentes longitudinale et transversale de l'outil, données du modèle) est indispensable. L'article ci-dessous fait le point sur la technique et le rôle de l'ingénierie géodésique et, simultanément, met en évidence les nouvelles exigences qui en résultent.

Lors de la réalisation de grands travaux publics, tels que construction de tunnels, de voies de chemins de fer, d'aéroport et de routes, de lourdes machines de chantier sont engagées. Traditionnellement, des niveleuses, des fraiseuses, des finisseuses à coffrages glissants et des finisseuses d'asphalte sont commandées au moyen d'un balayage mécanique de fils conducteurs en plan et en nivellement. Les travaux avec excavatrices, machines à chenilles ou à rouleau n'étaient jusqu'ici qu'indirectement contrôlés, i.e. par des travaux de mesures classiques. Des systèmes basés sur un laser rotatif et utilisant un plan horizontal ou légèrement incliné comme référence altimétrique des travaux de terrassement, existent depuis une vingtaine d'années. De ce fait et depuis plusieurs années, des systèmes qui balayent des fils conducteurs à l'aide de capteurs ultrasoniques ou copient une altitude de référence (p. ex. un revêtement de chaussée ancien ou fraisé) au moyen de capteurs ultrason, sont employés pour

l'affichage mais aussi pour le réglage des hauteurs. Au milieu des années 90, la possibilité de décrire un mouvement dans un ordre de grandeur proche du centimètre fit son apparition grâce au développement de nouvelles technologies telles que les tachéomètres motorisés et les récepteurs GPS en mode "Real-Time-Kinematic". Plus ou moins au même moment débuta l'engagement de capteurs 3D pour le guidage ou la commande de machines de chantier. À côté de la commande de tunneliers au moyen de tachéomètres motorisés, l'aiguillage tridimensionnel d'une finisseuse à coffrages glissants de marque Wirtgen pour la construction du nouveau tracé ICE entre Frankfort et Cologne fut une première en la matière. Également à la même époque, une finisseuse d'asphalte était guidée par tachéomètres motorisés sur un tronçon d'autoroute à proximité de St-Gall.

De nos jours, les travaux de terrassement, de pose et de rénovation de couches d'asphalte ou de béton requièrent de plus en plus souvent des systèmes de guidage visuel, pour une régulation des altitudes ou même pour un guidage 3D totalement automatisé. Cette approche basée sur un positionnement tridimensionnel en temps réel doit être considérée



Figure 1. Projet pilote : aiguillage tridimensionnel d'une finisseuse à coffrages glissants de marque Wirtgen pour la construction du nouveau tracé ICE entre Frankfort et Cologne, 1999 (à gauche) ; commande 3D d'une finisseuse d'asphalte pendant l'assainissement de l'autoroute à St-Gall - Suisse, 2000 (à droite)

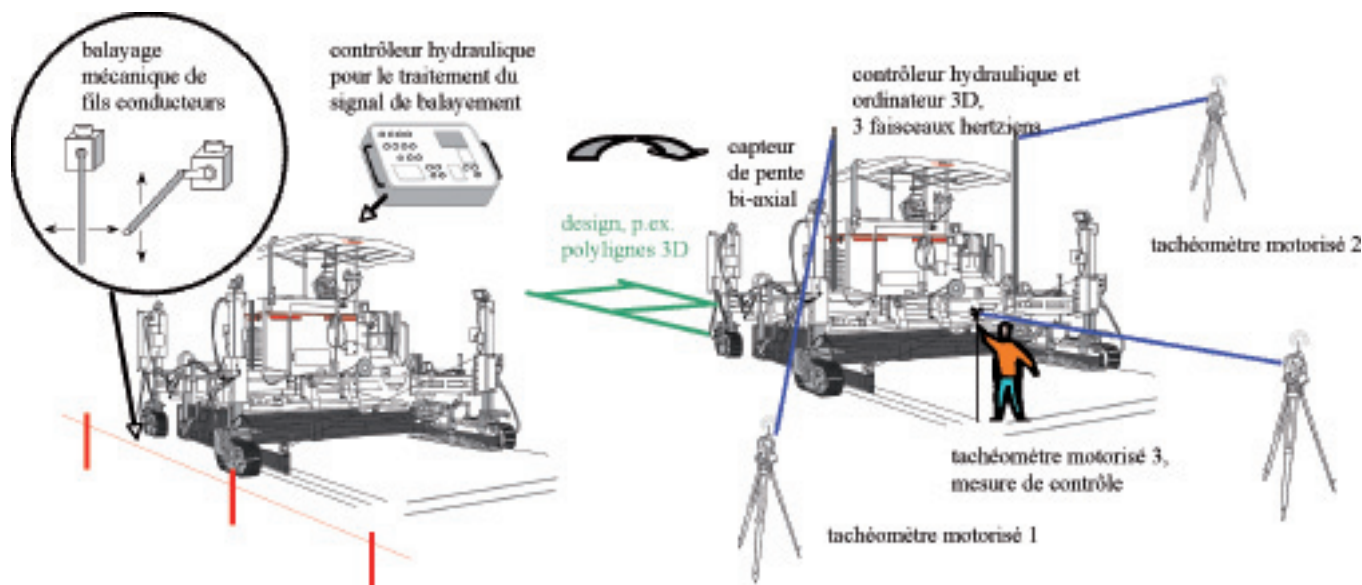


Figure 2. Procédé classique au moyen de fils conducteurs / Procédé 3D sans fil de finisseurs à coffrages glissants (Stempfhuber 2006)

comme faisant partie de l'ingénierie géodésique de par ses applications de réduction de pentes longitudinale et transversale et de détermination de l'orientation de la machine. L'exemple d'un système sans fil conventionnel pour finisseuses à coffrages glissants illustre bien cette transition (figure 2).

Classification des différents champs d'application

Lors de projets de grande envergure, comme par exemple la construction d'un nouveau tronçon d'autoroute, les différentes phases de travail se divisent en acquisition des données, levé préalable, préparation des données et élaboration d'un modèle, travaux de terrassement, rénovation et construction de couches ainsi que vitrification des couches.

Il en résulte une classification des systèmes en 1D ou 3D pour le guidage, la commande semi-automatique et celle entièrement automatique.

Cependant, les domaines de l'acquisition des données, de l'élaboration du modèle numérique de terrain correspondant ou de celle des polygones 3D sont à discuter. En raison de la diversité des formats de données, cette étape occupe un rôle central dans l'ensemble du projet. Différents fournisseurs de systèmes ont réalisé un flux de données plus ou moins continu entre leurs logiciels de bureau, un enregistreur de données pour récepteur GNSS et des tachéomètres avec fonctions de contrôle et vérification. La difficulté réside en général dans l'échange de données de différentes provenances. De plus, l'orientation visuelle, précisément le contrôle des fils conducteurs sur le chantier, fait défaut lors de l'utilisation de la commande de machines de chantier. Quelques

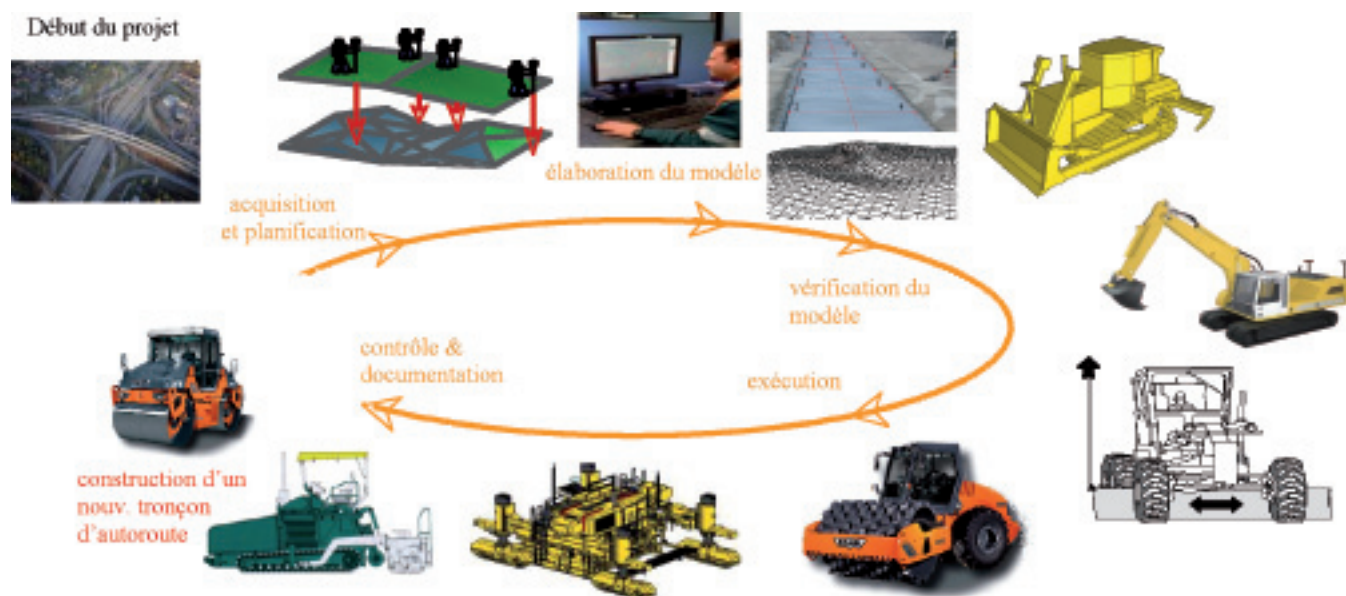


Figure 3. Application dans le cadre d'un nouveau tronçon d'autoroute

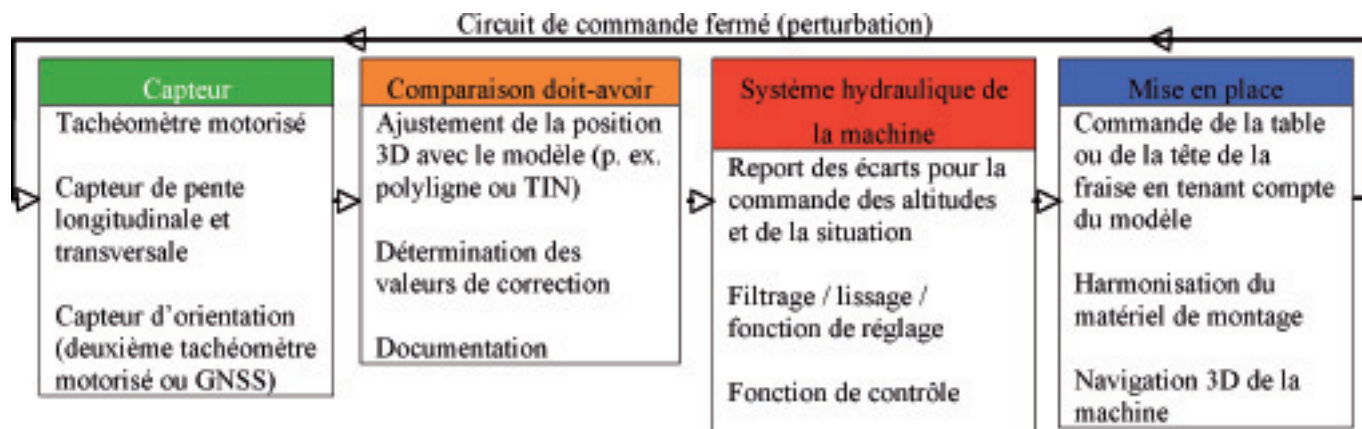


Figure 4. Circuit de réglage fermé comme exemple d'une commande tridimensionnelle totalement automatisée.

logiciels offrent des contrôles de plausibilité comme par exemple des relations de voisinage (le plus utilisé étant le maillage TIN ? Triangular Irregular Network) avec détermination du gradient maximum. En raison du manque de référence optique, le modèle de données doit absolument être vérifié avec l'engagement des machines. Il est parfois possible de réaliser un modèle simple directement sur le terrain, à partir des mesures, et de l'importer ensuite aussitôt sur l'ordinateur des machines.

■ Subdivision en systèmes de guidage et de commande

Pour faire preuve de plus d'exactitude avec la terminologie, il convient de distinguer les systèmes de guidage, également appelés systèmes de conduite, des systèmes de commande. Les systèmes de commande automatique sont aussi bien utilisés pour un réglage altimétrique automatique que pour un réglage tridimensionnel. Une classification s'effectue de la manière suivante :

Systèmes de guidage

Les systèmes de guidage (English = Indicate or Guidance Systems) utilisent des procédés dans lesquels des informations visuelles qui concernent la manipulation de la machine, respectivement de l'outil (p. ex. la pelle d'une excavatrice ou des lames de bulldozers, de niveleuses), sont préparées à l'intention du machiniste. Ces indications peuvent être référencées en 1D avec mention de hauteur ou de pente, ou en 3D. Le circuit hydraulique de la machine n'est ici pas l'objet d'une discussion. Etant donné que l'opérateur commande sa machine manuellement, les aspects importants de sécurité des systèmes sont à respecter dans une moindre mesure. L'obtention de bons résultats exige ici encore et toujours un machiniste expérimenté.

Systèmes semi-automatiques

Dans le cas de systèmes semi-automatiques (English = Control Systems or Grade Control), la position 2D de la machine est représentée graphiquement par rapport au modèle de données et la hauteur de l'outil est réglée avec la pente transversale correspondante. Le principe de réglage altimétrique est semblable aussi bien pour les procédés

conventionnels que pour ceux basés sur un positionnement 3D. L'écart altimétrique entre le "doit" et l'"avoir" est transmis au circuit hydraulique en tant que grandeurs de commande préalablement filtrées. Un contrôleur universel endosse ici la communication entre le système de mesure et la soupape hydraulique. De tels systèmes sont surtout utilisés avec des niveleuses, des véhicules chenillés, des raboteuses mais aussi des finisseuses d'asphalte, pour lesquels le réglage altimétrique d'une table flottante représente un processus complexe lors de la pose de l'asphalte. Le machiniste conduit et dirige seul la machine, alors que le circuit de réglage fermé commande l'outil ou le soc automatiquement. Les premiers systèmes qui permettent un réglage altimétrique de la pelle d'une excavatrice existent également.

Système de commande 3D entièrement automatique

Les systèmes de commande 3D entièrement automatique (English = 3D-Control) sont actuellement employés exclusivement avec les finisseuses à coffrages glissants, i.e. pour la pose de béton. A cette occasion, on effectue aussi bien la commande altimétrique que la commande directionnelle, i.e. une navigation autonome de la machine. La comparaison 3D entre le "doit" et l'"avoir" définit en même temps les grandeurs de commande hydraulique. Le machiniste n'a plus qu'à réguler la vitesse. Ces applications qui demandent une précision de l'ordre de 5 mm, fixent de très hautes exigences pour l'entier du système et ne peuvent être atteintes que si, d'une part l'instrumentation est à même d'atteindre ces performances, d'autre part les capteurs sont synchronisés de manière suffisante.

Un circuit de réglage fermé constitue le fondement aussi bien des systèmes de commande semi-automatique que des systèmes de commande entièrement automatique. Les étapes suivantes seront exécutées séquentiellement par le logiciel (figure 4). Un listage des applications les plus courantes (tableau 1), groupées par machine de chantier, avec les subdivisions correspondant aux systèmes de guidage et de commande ainsi qu'aux attributions des exigences de précision et de vitesse maximale, peut être utilisé comme aperçu. Des variations à l'intérieur même de ce tableau sont certainement à prévoir, dans un contexte global, pour chacun des projets de construction de routes considérés.



Machine \ Paramètre	Précision altimétrique	Précision planimétrique	Vitesse	Guidage de machine	Commande de machine
Niveleuse	10-20 mm	20-30 mm	Jusqu'à 35 km/h	✓	Altimétrie uniquement
Véhicule chenillé	20-30 mm	20-50 mm	Jusqu'à 12 km/h	✓	Altimétrie uniquement
Excavatrice	20-30 mm	20-50 mm	-	✓	X
Finisseuse d'asphalte	5 mm	5 mm	Jusqu'à 10 m/min	X	Altimétrie uniquement / 3D
Finisseuse de béton	5 mm	5 mm	Jusqu'à 3 m/min	X	✓
Curb & Gutter	5 mm	5 mm	Jusqu'à 5 m/min	X	✓
Fraise	5-10 mm	10-20 mm	Jusqu'à 15 km/h	X	Altimétrie uniquement / 3D
Rouleau	-	10-20 mm	Jusqu'à 10 km/h	✓	X

Tableau 1. Classification selon le domaine d'utilisation, ✓ = système existant / X = système pas (encore) existant

Les systèmes de guidage 1D avec pente transversale sont fréquemment considérés, selon la terminologie employée pour le guidage et la commande de machines de chantier, comme étant des systèmes 2D. Il en va de même pour les systèmes semi-automatiques définis comme systèmes de commande 3D. D'un point de vue géodésique, cette définition n'est pas commune.

■ Fournisseur de système

Des fabricants d'instruments de mesure géodésiques comme Trimble et Topcon/Sauer-Danfoss offrent simultanément des systèmes pour le guidage et la commande de machines de chantier. Les produits de Leica Geosystems se réduisent, à quelques exceptions près, à ceux des entreprises SBG, Mikrofynd, Scanlaser et Topolaser dans la "Hexagon Machine Control Division", bien que celles-ci n'apparaissent pas sous un "Brand Label" commun. D'autres systèmes sont, notamment, proposés par les entreprises Carlson, Moba, Wirth, Novatron, Romar, Prolec, Novariant et Axiomatic. Les systèmes 3D basés sur la technologie GNSS ou sur des tachéomètres motorisés ne représentent ici qu'un infime pourcentage du marché mondial estimé à plus de 100 Mio d'euros. Cette section définit toutefois l'interface entre l'ingénierie géodésique et le domaine de guidage et de commande 3D de machines de chantier.

Technique sensorielle de mesure

Les applications non basées sur des capteurs de positionnement 3D utilisent des lasers rotatifs, des capteurs ultrason, un balayage de fils conducteurs optique ou mécanique en relation avec des capteurs de pente, pour la détermination des paramètres de réglage. Le laser rotatif définit un plan homogène et horizontal ou légèrement incliné dans un rayon de quelques centaines de mètres. Au moyen d'un ou deux récepteurs laser placés sur la machine, il est possible d'afficher les hauteurs relative et absolue. Cette hauteur peut également être utilisée en tant que paramètre pour le réglage altimétrique (Stempfhuber 2007). Les capteurs ultrason "mesurent" la différence de hauteur jusqu'au revêtement de la chaussée et permettent de gérer la hauteur de l'outil à gauche et à droite au moyen de régulateurs de pente transversale supplémentaires. Par exemple, le Moba Big Sonic Ski combine chaque distance mesurée par les capteurs ultrason puis calcule une distance moyenne à la surface existante de la chaussée (fig. 5). Ce procédé est utilisé par presque toutes les finisseuses d'asphalte.

Les capteurs de mesures 3D sont généralement utilisés avec des modèles inhomogènes. Mis à part cette application, les capteurs de mesures 3D représentent d'importants fondements pour les systèmes de commande 3D entièrement automatique.



Figure 5. Report altimétrique à partir de mesures de distance qui proviennent de plusieurs capteurs ultrason, à l'exemple de Moba Big Sonic Ski (www.moba.de).

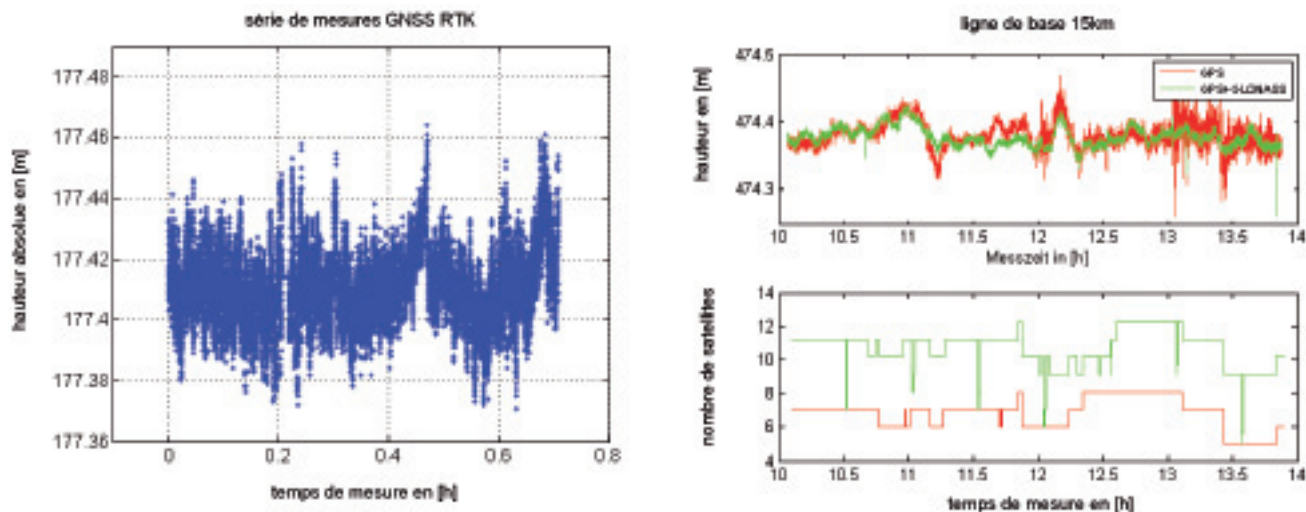


Figure 6. Précision altimétrique d'un point statique à partir de mesures cinématiques GNSS.



■ Récepteur GNSS

Tous les fabricants et utilisateurs essaient de couvrir un domaine d'application aussi large que possible au travers de la technologie GNSS. Pour le machiniste, l'utilisation est certainement plus simple qu'avec des tachéomètres motorisés. Ceci est notamment dû à la configuration du système et au déroulement de la transformation de coordonnées. Chaque utilisation s'appuie et est évaluée sur la base des paramètres de la constellation satellite (nombre de satellites et valeurs DOP). Les paramètres de transformation du système de projection sont établis, en règle générale, au moyen du modèle de données fourni par les géodésiens, puis transférés dans le système de commande de la machine. Tout comme la vérification des données, cette tâche doit cependant faire l'objet d'une attention particulière. Le système est poussé à ses limites physiques lorsque la précision altimétrique doit atteindre 1 à 2 cm, notamment en cas de mauvaise couverture satellites ou d'applications en temps réel. Les récepteurs GNSS fournissent, pour les applications en temps réel, une précision altimétrique de l'ordre de plusieurs centimètres (fig. 6 et 7) qui dépend de l'endroit où l'on se trouve. A titre d'exemple, une représentation altimétrique typique de mouvements horizontaux.

La vérification des observations GNSS avec et sans satellites GLONASS doit, en raison de la complexité, être l'objet d'une évaluation minutieuse. L'augmentation de la précision au moyen de satellite GLONASS ne fait ici l'objet d'aucun complément. De manière différente à celle de l'illustration droite de la figure 6, l'influence des satellites GLONASS peut aussi se traduire, le cas échéant, par des pertes de précision. Une disponibilité plus élevée de satellites est certainement un pas vers l'acceptation de ce procédé d'observation. Trimble (GCS900 Laser Augmentation) tout comme Topcon (mmGPS) proposent différentes technologies pour augmenter la précision altimétrique en combinant laser rotatif et récepteur GNSS. Il convient encore de prendre en considération, lors de projets de construction de routes, la correction entre les hauteurs orthométriques et ellipsoïdales.

A côté des informations altimétriques et planimétriques, l'orientation de la machine, relativement au modèle, doit être connue dans un ordre de grandeur de 1°. Pour cette raison, plusieurs applications utilisent une seconde antenne Rover afin de déterminer une ligne de base. Par conséquent, les points de contrôle excentriques ainsi que la position de la machine se laissent calculer de manière absolue par rapport au modèle. Le premier brevet en la matière a été déposé par Caterpillar en 1995. Les capteurs de direction (boussole GPS p.ex.) qui se basent sur la fréquence L1 et une courte ligne de base, ne peuvent pas atteindre la précision exigée ci-dessus pour la détermination de directions. Des tests ont révélé des écarts qui s'élèvent jusqu'à 10° pour des constellations satellites défavorables. Un capteur qui mesure le champ magnétique n'est, en raison des perturbations métalliques, qu'une alternative très limitée. Une approche totalement nouvelle consiste à déterminer l'orientation absolue d'une antenne GNSS à partir d'une certaine dégradation du signal satellite. Cette manière de procéder est actuellement vérifiée et approfondie dans un environnement universitaire à l'institut de géodésie et de photogrammétrie (IGP) de l'EPF Zurich (Grimm 2007).

■ Tachéomètre motorisé

Les tachéomètres motorisés sont employés pour la détermination précise de la position d'un objet en mouvement lent. En prenant en compte tous les facteurs qui influencent les mesures, il est possible d'atteindre une précision de 5 mm dans un rayon de 50 m. Pour une distance croissante entre le prisme 360° et l'instrument, la précision planimétrique et altimétrique atteint rapidement l'ordre du centimètre. Par le passé, plusieurs travaux ont été consacrés à l'analyse de la précision ainsi qu'à la calibration des composantes de tels systèmes (Hennes 1999, Kuhlmann 1999, ou Stempfhuber 2004). Entre-temps, les tachéomètres motorisés ont été optimisés pour des applications cinématiques en raison des exigences posées par la commande de machines de chantier. A l'heure actuelle, des entreprises telles Topcon, Leica, Trimble

et Sokia, proposent des instruments qui remplissent les exigences énoncées ci-dessus. Les influences des erreurs systématiques, dues par exemple à une synchronisation rudimentaire des mesures angulaires ou de distance, sont réduites au moyen d'interpolations qui dépendent du domaine temporel (Wagner 2006). Les grandeurs suivantes doivent être optimisées pour une utilisation exacte de commande 3D :

- Stabilité du Lock (qualité de la poursuite de la cible)
- Concordance entre la poursuite de la cible et le servomoteur (algorithme de régulation)
- Vitesse des servomoteurs
- Stabilité du transfert de données (liaison radio), réduction des perturbations du signal
- Procédé pour une recherche rapide de prismes
- Utilisation d'un capteur bi-axial lors d'applications cinématiques
- Fréquence de mesure suffisante d'au moins 10 Hz
- Minimisation du temps de latence (relatif et absolu)
- Robustesse de l'instrument soumis aux conditions du chantier
- Qualité et précision des prismes 360°
- Convivialité des applications
- Précision absolue du positionnement planimétrique des mesures cinématiques

Ces paramètres qui décrivent l'aptitude au terrain et la précision des tachéomètres motorisés, doivent être pris en considération lors de l'évaluation des applications cinématiques. Généralement, l'utilisation des instruments de mesures terrestres pour une détermination précise de la position tridimensionnelle de machines de chantier est moindre en comparaison à la technologie GNSS. De la configuration de l'instrument à l'installation de la liaison radio jusqu'à la machine via le positionnement de la machine et de la station libre, ce sont ici bien plus d'étapes à réaliser pour le tachéomètre motorisé. La réactivité aux erreurs et la nécessité d'avoir une visibilité directe sont des critères supplémentaires qui réduisent le champ d'application. De plus, en raison de la diminu-

tion de la précision lors de longues distances, il est nécessaire de déplacer fréquemment l'instrument. La comparaison directe de ces deux procédés aide à faire le choix du système le plus approprié. La juxtaposition dans l'illustration de gauche (cf. fig. 7) de la composante altimétrique du GNSS avec les observations simultanées d'un tachéomètre motorisé confirme cet énoncé pour un domaine proche (modèle horizontal, vitesse de la machine de chantier d'environ trois mètres par minute). L'illustration de droite résulte d'une estimation théorique de toutes les influences en fonction de la distance.

Ces énoncés sur la précision sont actuellement vérifiés à l'aide du rail de calibration de l'IGP de l'EPF Zurich avec différents instruments. Un interféromètre laser fixe la référence. De surcroît, on analyse la qualité de la poursuite de la cible plus exactement. Comme énoncé au paragraphe 3.1, l'orientation de la machine est obtenue simplement à partir d'un second positionnement 3D. Ceci peut aussi bien se réaliser à l'aide d'un Rover GNSS que d'un second tachéomètre motorisé, dans quel cas deux réflecteurs perturbent fréquemment la poursuite de la cible. Simultanément au positionnement 3D et à l'orientation absolue de la machine, les pentes longitudinale et transversale, relatives au modèle, vont être déterminées. Des capteurs de pente qui s'appuient sur diverses techniques de mesures vont être employés à cet effet.

■ Capteurs de pentes bi-axiaux

Les capteurs de pentes bi-axiaux permettent de déterminer deux des six degrés de liberté qui définissent l'orientation d'une machine de chantier. L'université technique de Graz (TU Graz) étudie les capteurs modernes du point de vue de la stabilité de leur point neutre, de leur comportement vis-à-vis de la chaleur et en présence de variations de température ainsi que leur comportement cinématique (Brunner 2006). Les aspects les plus importants sont ici le comportement dans les conditions d'un chantier ainsi que l'exacte définition du temps de latence. Une configuration idéale du capteur passe par une

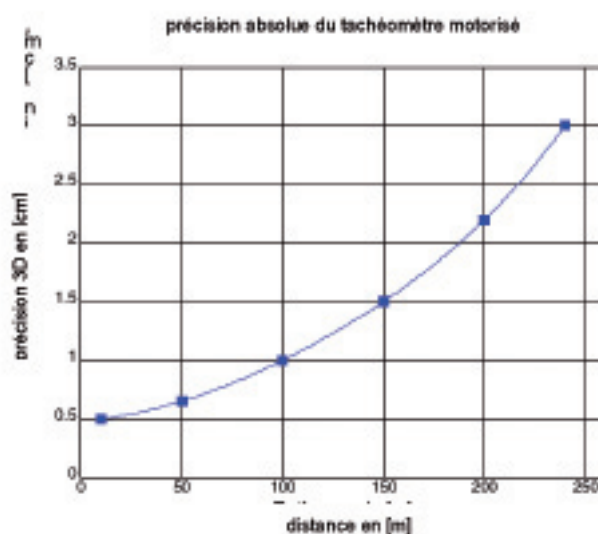
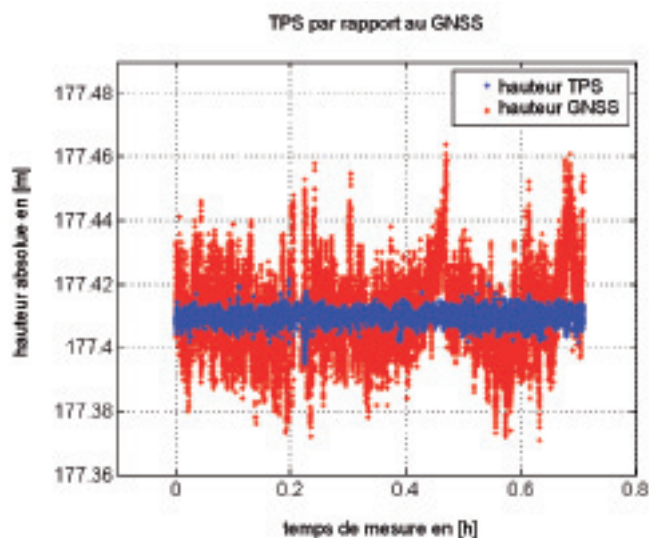


Figure 7. Comparaison altimétrique d'un tachéomètre motorisé avec un récepteur GNSS / Estimation de la précision d'un tachéomètre motorisé (Stempfhuber, 2007)

Capteur	Grandeur mesurée / grandeur de sortie	Précision cinématique	Portée	Fréquence de mesure	Temps mort
Récepteur GNSS	Dérivé : XYZ et temps	Situation : 2-3 cm Altimétrie : 3-5 cm	Radio RTK (env. 5-6 km de portée en Europe)	20 Hz	20-50 ms
Tachéomètre motorisé	Distance et direction / XYZ	Situation : 1 cm, Altimétrie : 1 cm, (dépend de la distance, cf. fig. 7)	env. 200-250 m, mesures jusqu'à env. 1000 m possibles par bonnes conditions	env. 10 Hz	50-250 ms
Laser rotatif	Référence altimétrique relative ou absolue	2-5 mm jusqu'à 100 m	200-300 m		< 10 ms
Capteurs de pente	Pentes longitudinale et transversale	0.1-0.3°	Directement sur l'objet	> 100 Hz	80-500 ms
Capteur d'orientation GPS	Gisement	10°	Directement sur l'objet	10 Hz	< 10 ms
Capteur ultrason	Distance	1 mm	Quelques mètres	> 100 Hz	Aucune indication

Tableau 2. Assemblage de différents procédés de mesures pour le guidage et la commande de machine de chantier.

pesée d'intérêts entre la durée et le type de la formation de la valeur moyenne. Lors de temps de réponse très courts, un bruit trop élevé dans les mesures en résulte. Une formation de la moyenne plus longue sur la base d'une grande quantité de mesures isolées conduit rapidement à un temps de réponse supérieur à 500 ms. Différentes recherches confirment ceci par opposition aux mesures optimisées de pentes et de positionnement 3D. Par conséquent, la configuration de celui-ci, basée en règle générale sur des capteurs CAN Bus, doit satisfaire à l'application correspondante.

Le tableau ci-dessus, basé sur les indications trouvées dans Bayer 2004, donne un aperçu des capteurs de mesures actuels qui servent aux applications de guidage et de commande de machines de chantier.

Étant donné que les systèmes de mesure inertiels ne sont pas employés pour le guidage et la commande de machine de chantier, ils ne sont pas présentés dans le tableau ci-dessus.

Calcul des grandeurs de commande

Pour les applications en 1D (niveleuses et véhicules chenillés) la détermination de la hauteur "doit" se calculer très simplement. La plupart du temps, on ajuste au laser rotatif une base altimétrique absolue en relation à un point de référence. Sur la machine, la mesure est affichée sous forme de différence de hauteur par rapport à l'altitude de référence. Il existe des systèmes avec un récepteur laser et un couplage du capteur de pente transversale ainsi que des systèmes avec deux récepteurs laser de part et d'autre du soc. Le domaine d'activité est limité, de par la grandeur du récepteur laser, à quelques décimètres. Différents systèmes modifient toutefois mécaniquement la hauteur du bras et élargissent du même coup le domaine d'activité. Les systèmes de commande semi-automatique se basent sur une approche identique. Pour ce faire,

les valeurs d'ajustage gauche et droite ne sont pas affichées graphiquement, mais régulées au moyen du circuit hydraulique. Le modèle de données n'est ici pas nécessaire, on utilisera uniquement un plan de référence.

Les applications 1D des excavatrices utilisent également un laser rotatif, combiné avec des capteurs angulaires placés sur le bras de l'excavatrice, pour le calcul de la hauteur "doit" de la pelle. S'il fallait réaliser un modèle complexe, comme par exemple des talus inclinés, on utiliserait alors un système 3D. La position et l'orientation absolues des deux antennes Rover GNSS sur le châssis de l'excavatrice seront réduites au

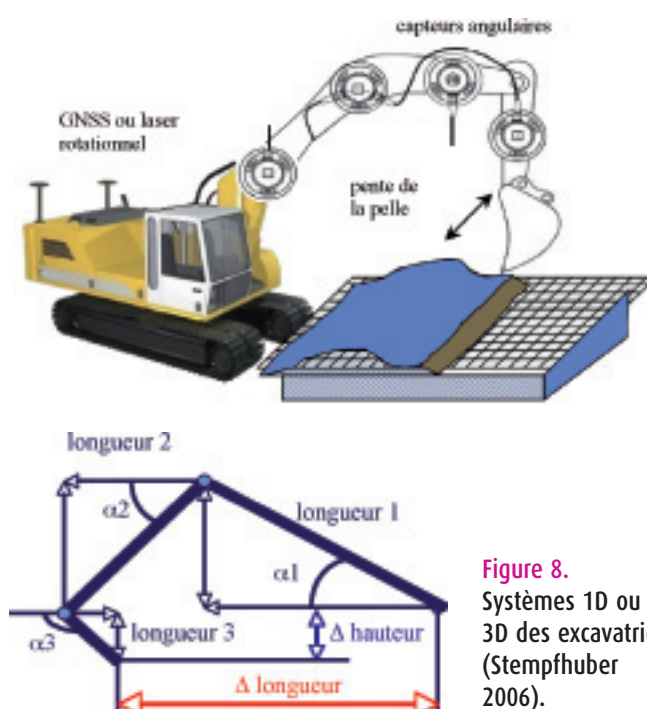


Figure 8. Systèmes 1D ou 3D des excavatrices (Stempfhuber 2006).

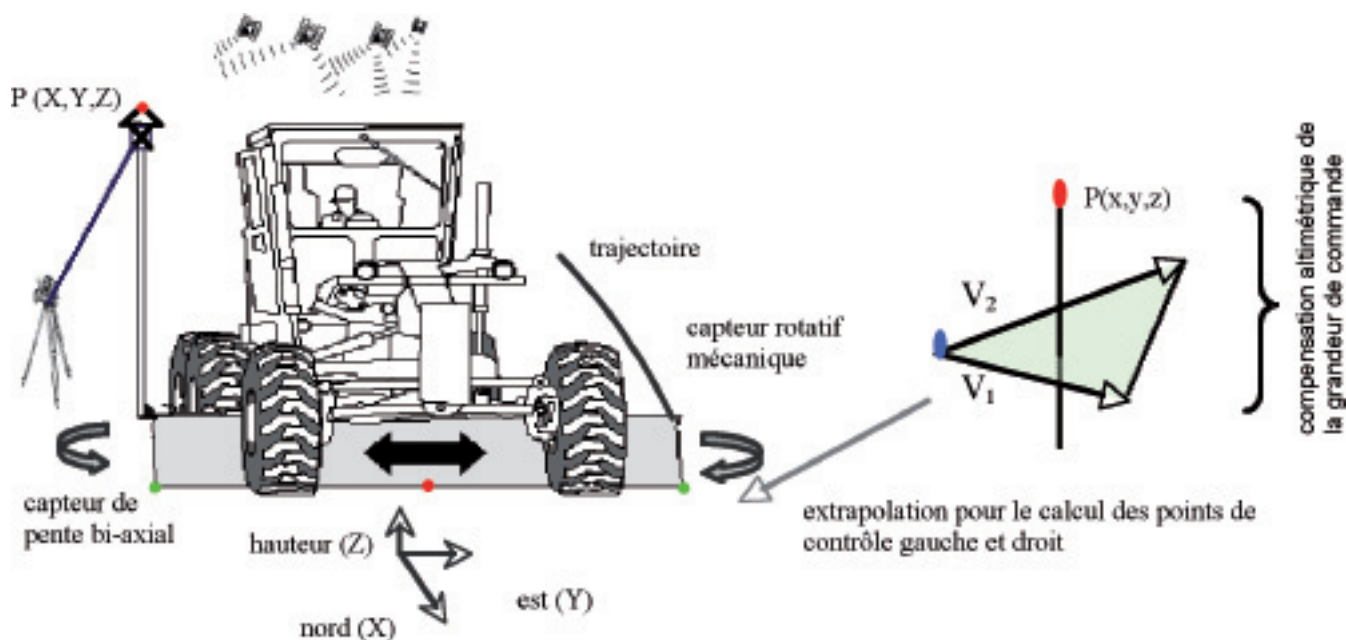


Figure 9. Calcul des grandeurs de commandes pour une niveleuse / Détermination du point de poussée dans le modèle TIN

modèle 3D par des méthodes de calcul identiques à celles énoncées ci-dessus.

Les systèmes de commande semi-automatique, i.e. de régulation altimétrique automatique, sont définis par deux points de contrôle gauche et droit. Ces étapes de calcul sont commentées pour l'exemple d'une commande altimétrique de niveleuse et peuvent être reportées pour les applications des véhicules chenillés, les fraises et les finisseuses d'asphalte via une arête définie de la table.

Dans ce but, on calculera les deux valeurs "doit" de l'outil à partir d'un point connu en 3D (GNSS ou tachéomètre motorisé), de l'orientation (à partir de la trajectoire ou au moyen d'un capteur additionnel) et des indications relatives à la pente. Les étapes de calcul suivantes seront implémentées de manière séquentielle dans un algorithme de régulation (circuit fermé) :

- Acquisition de la position 3D (Fréquence de mesure d'env. 10-20 Hz)
- Acquisition ou calcul de l'orientation absolue de la machine par rapport au modèle
- Réduction des pentes longitudinale et transversale resp. d'un point moyen sur le soc
- Extrapolation à partir d'une mesure locale pour la détermination des arêtes inférieures gauche et droite du soc
- Correction de la rotation du soc et du déplacement latéral (uniquement pour la niveleuse)
- Transformation de ces deux grandeurs absolues dans le modèle (en règle générale, un MNT avec maillage triangulaire)
- Détermination des écarts altimétriques gauche et droit et le cas échéant extrapolation à la couronne du modèle
- Multiplication avec les paramètres de réglage (le cas échéant, filtrage des données)
- Envoi des paramètres de régulation à la soupape hydraulique

A l'avenir, les soupapes mécaniques de régulation sur la machine de chantier seront certainement dirigeables électriquement. Par conséquent, les valeurs de commande altimétrique et tridimensionnelle pourront être directement écrites dans le "bus" de la machine. Une conversion du signal analogue pour le contrôleur de la machine est cependant obsolète.

Contrairement à ce qui précède, on définit pour les finisseuses à coffrages glissants quatre points altimétriques de contrôle sur les bords de la table et deux points planimétriques de contrôle soit sur les arêtes gauche et droite de la table, soit au milieu de celle-ci. Le procédé des étapes de calcul est, lui, comparable à celui notamment des niveleuses, bien que l'orientation de la machine doive ici être déterminée sans exception au moyen d'une deuxième position 3D.

La manière de procéder pour déterminer chaque point de contrôle et la comparaison "doit-avoir" par rapport à un modèle de données s'appuie pour l'essentiel sur une approche semblable. De simples réductions géométriques permettent la mesure excentrique des valeurs de commande.

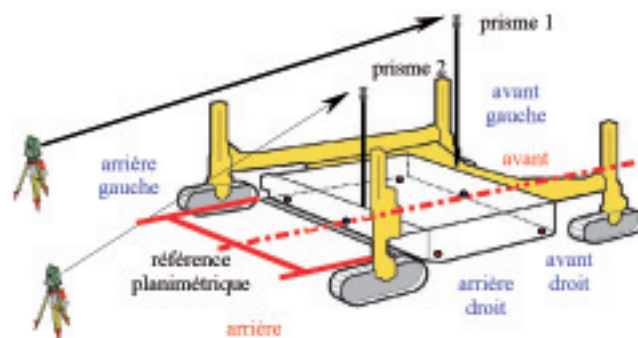


Figure 10. Points de contrôle sur une finisseuse à coffrages glissants de grande envergure (Stempfhuber 2007)

Perspectives

Depuis la fin des années 90, cette tendance mondiale se répand sur plusieurs chantiers. Une motivation pour l'utilisation des méthodes cinématiques d'implantation en lieu et place des méthodes conventionnelles réside dans des critères tels que l'augmentation de l'efficacité et de la précision ainsi que la réduction des frais de personnel mais aussi de matériel. Les tâches traditionnelles, telles que l'implantation de fils conducteurs ou le contrôle des terrassements, disparaissent. De nouvelles tâches naissent : l'acquisition et la modélisation de données, l'encadrement ainsi que la vérification du système. Cette transition dans un monde virtuel représente des changements fondamentaux dans l'ingénierie géodésique. Le travail d'un ingénieur en mensuration se transforme en celui d'un ingénieur système. Celui-ci vient encadrer l'entier du processus de travail et garantit un déroulement des guidages et commandes de machines de chantier sans difficulté et exempt d'erreur. Le niveau d'encadrement dépend ici fortement de l'application. La préparation du travail est une tâche prioritaire dans le domaine du terrassement. Les applications 3D avec des finisseuses à coffrages glissants ou des finisseuses d'asphalte sont encadrées continuellement par les géodésiens. Actuellement, la nouvelle direction prise par ce type de travaux s'impose de par l'introduction de données digitales avec les procédés cinématiques d'implantation.

Les développements rapides, dus aussi bien à la communication entre le système de mesure et la machine qu'à l'optimisation des instruments utilisés, ont apporté une contribution importante. Cependant, nous ne sommes qu'au commencement de ce segment mondial croissant. La prochaine étape sera d'imposer, de manière identique aux systèmes de navigation dans l'industrie automobile, des systèmes intégrés. Les systèmes de mesure et de traitement devront être adaptés à ces nouvelles exigences. L'ingénierie géodésique doit emboîter le pas à ces rapides évolutions. Aucun autre professionnel ne couvre mieux, au travers de sa formation, un tel domaine. ●

Contacts

Werner STEMPFHUBER
Hilmar INGENSAND

Institut de géodésie et de photogrammétrie, ETH Zurich
Stempfhuber@geod.baug.ethz.ch
Ingensand@geod.baug.ethz.ch

Bibliographie

Bayer, G. Geometrische Führung von Baumaschinen.
In: DVW Schriftenreihe Band 45/2004, Kinematische Messmethoden, Vermessung in Bewegung, S. 215-232, Wittwer Verlag Augsburg, 2004.

Brunner, K. Neigungssensoren: Untersuchungen.
In: Sitzung der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel, ETH Zürich, 2006.

Grimm, D. GPS Direction Finding, Neringa 2007.
In: GEODESZIJA IR KARTOGRAFIJA,
(en préparation, www.vtu.lt/leidiniai), 2008.

Hennes, M. Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern.
AVN 106, S. 374-385, 1999.

Kuhlmann, H. Sensorik - zielverfolgender Tachymeter.
In: Mitteilungen des Landesvereins Baden-Württemberg des DVW, 46 Jahrgang, Heft 2, Stuttgart, 1999.

Schwieger, V. Optimierung von Regelalgorithmen zur Baumaschinensteuerung am Beispiel eines Simulators.
In: Brunner, F. (Hrsg.) Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, S. 355-368, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.

Stempfhuber, W. Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. DKG-Reihe C, Heft Nr. 576, 2004.

Stempfhuber, W. 1D and 3D Systems in Machine Automation.
FIG 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, 2006.

Stempfhuber, W. Herausforderungen der 3D-Baumaschinensteuerung. In: Brunner, F. (Hrsg.) Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, S. 343-354, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.

Wagner, M. Trimble ATS-Totalstation: Moderne hochgenaue Tracking-Systeme für Anwendungen in der Baubranche. (www.trimble.com/ats_wp.asp), 2006.

Zimmermann, D. Dreidimensional gesteuerte Baumaschinen.
In: Ingensand, H. (Hrsg.) Ingenieurvermessung 04, 14th International Course on Engineering Surveying, ETH Zurich, S. 193-204, 2004.

ABSTRACT

Key words: Machine guidance and control, 3D measurement sensor, construction

Machine Control and Machine Guidance is a subarea of Engineering Geodesy. All required tasks such as data collection and -verification, design data processing, calculation of the control parameters have to be in a close collaboration with the machine construction engineer, the experts in the field of cybernetics and the fore man of the construction site. This new technology covers the full range of Geodetic Metrology and Engineering Geodesy. Furthermore, an overall understanding of the geometric configuration between the 3D-trajectory, all additional information such as the machine orientation, the long- and cross slope related to all control points and the interaction of the design data. The aim of this report is to describe and to define all requirements of our professional skills.

Coordonnées répertoriées dans la Géographie de Claude Ptolémée

Une explication vraisemblable de la surévaluation des longitudes par l'observation des éclipses de Soleil

■ Pierre HERRMANN

NOTE DE LA RÉDACTION D'XYZ : L'auteur, d'une érudition certaine, n'est spécialisé ni en Astronomie ni en Sciences géographiques. Ainsi, il émet dans cet article certaines hypothèses originales, voire anticonformistes. Elles trouveront une vérification probante dans l'article suivant de Robert Vincent.

■ MOTS-CLÉS

Coordonnées, éclipses, (éclipses de Soleil, éclipses de Lune), géographie (Géographie), gnomon, latitude, longitude, Ptolémée (Claude), Table de Peutinger - Chine, Inde, Empire romain.

Les coordonnées mentionnées dans la Géographie de Claude Ptolémée résultent de mesures et non d'évaluations, comme on l'admet usuellement. L'analyse des méthodes de mesure disponibles à l'époque montre que la précision des latitudes est correcte. Les longitudes présentent une bonne corrélation linéaire avec celles connues aujourd'hui : le méridien zéro est à 11° 20' à l'ouest de Greenwich ; la surévaluation est de 47 %. L'examen des méthodes de mesure révèle qu'elles ont été

déduites de l'observation d'éclipses de Soleil : manifestement l'auteur de la Géographie ignorait qu'elles ne sont pas observables partout au même moment, ce qui explique la surévaluation des longitudes. Dans l'article suivant de Robert Vincent, un calcul des longitudes à partir des heures de passage de l'éclipse de Soleil du 11 août 1999 montre que la surévaluation des longitudes avait exactement la même valeur que celle déduite des longitudes de la Géographie : ceci valide on ne peut mieux notre hypothèse. La mesure des coordonnées a requis un énorme travail : divers indices montrent qu'il résulte certainement d'une coopération internationale (Chine, Inde et Rome).

Qui plus est, Ptolémée ne s'est probablement pas impliqué dans la mesure des coordonnées, elles ont certainement été insérées dans la Géographie après sa mort.

Claude Ptolémée a vécu au II^e siècle de notre ère à Alexandrie. Ses traités d'astrologie et d'astronomie l'ont rendu célèbre. Mais surtout, il a rédigé une "Géographie" qui se compose de huit livres : six d'entre eux – du deuxième au septième – listent environ huit mille toponymes avec leurs coordonnées ; divers commentaires géographiques y ont été insérés.

Les lieux décrits se situent dans l'Empire romain mais également dans d'autres pays, y compris en Chine. La proportion de lieux facilement identifiables varie

selon les régions ⁽¹⁾ : élevée dans la partie occidentale de l'Empire, elle faiblit au fur et à mesure que l'on s'approche de l'Orient, pour devenir infime au-delà des frontières.

Lorsque l'on compare les coordonnées de la Géographie avec celles mesurées à l'époque actuelle, des désaccords importants apparaissent ⁽²⁾. Les érudits les ont donc critiquées ⁽³⁾, ce qui explique qu'elles aient été peu étudiées à ce jour ⁽⁴⁾.

Dans le premier livre, Ptolémée cherche comment réaliser des cartes : ce livre constitue une bonne introduc-

tion au huitième qui en contient plusieurs. Ce qu'il écrit concernant la mesure des coordonnées peut se comprendre en ce sens : celles-ci sont utiles parce que les cartes en sont déduites. En revanche, il s'étend peu sur la provenance de ces coordonnées : il révèle seulement qu'il y a des incompatibilités entre les données disponibles de son temps et celles qui ont été fournies par Marin de Tyr. Ce dernier ayant vraisemblablement vécu peu de temps avant Ptolémée ⁽⁵⁾, des mesures ont certainement été entreprises à cette époque, mais nous ne pouvons pas savoir si les coordonnées consignées dans la Géographie sont celles de Marin de Tyr ou si elles résultent de nouvelles mesures. Il aurait pourtant été logique que Ptolémée s'explique sur ce point : à défaut l'on peut s'interroger sur le lien existant entre le géographe et la liste des coordonnées.

Il est également difficile d'établir une relation entre les cartes du huitième livre et les listes de toponymes avec leurs coordonnées contenues dans les six autres : en dehors de l'Empire l'on retrouve rarement les mêmes toponymes. Divers indices ont amené certains érudits à considérer ces cartes comme des adjonctions tardives ; notons cependant que l'une d'entre elles montre la déformation caractéristique des projections préconisées par Ptolémée. Suite à ces incertitudes, nous ne tiendrons pas compte des cartes et ne chercherons pas à en établir nous-mêmes. Nous ne nous livrerons pas non plus à une étude toponymique qui



a déjà été tentée, du moins pour certaines régions.

Nous n'examinons ici que les coordonnées de la Géographie. Comme toutes les localités ne peuvent être identifiées, notamment en Orient, nous avons sélectionné une centaine d'entre elles en limitant leur nombre en Occident, de manière à ne pas sous-estimer les autres régions. Malheureusement, en dehors de la capitale de la Chine, aucun toponyme situé en dehors des empires parthe et romain n'a pu être retenu.

Latitudes des toponymes listés dans la Géographie

Divers auteurs antiques ont publié quelques latitudes⁽⁶⁾. Plus tard, à l'apogée du califat de Bagdad, des géographes ont édité des listes de toponymes avec leurs coordonnées : leur comparaison avec ceux de la Géographie est délicate car la plupart des noms diffèrent considérablement⁽⁷⁾. Environ la moitié des coordonnées publiées par al-Battani correspondent à celles de Ptolémée, la proportion descend à un quart pour celles de Yāqūt et n'est que de dix pour-cent pour celles d'al-Khwarazmi. Néanmoins, il est rare que les deux coordonnées (latitude et longitude) d'un toponyme correspondent en même temps à celles indiquées par Ptolémée : la proportion n'est que d'une quinzaine de pour-cent pour al-Battani et Yāqūt et infime pour al-Khwarazmi. Il est donc invraisemblable que ce dernier ait recopié Ptolémée, et peu probable que les deux autres géographes aient procédé à de simples compilations accompagnées d'une réactualisation des toponymes. Les listes réalisées par les géographes arabes sont pratiquement restreintes au califat, ce qui limite les possibilités de comparaison à une quinzaine de villes⁽⁸⁾ (voir tableau).

En Occident, l'on ne publiera des listes de toponymes avec coordonnées que

bien plus tard. En 1530 Oronce Fine surévalue encore les latitudes de 52 minutes en moyenne, l'écart-type n'étant cependant plus que de 15 minutes⁽⁹⁾.

Les latitudes incluses dans la Géographie ont vraisemblablement été mesurées à partir de la longueur minimale de l'ombre d'un gnomon, lors des équinoxes, la latitude étant alors le complément à 90° de l'angle de hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon. Cette méthode semble facile mais sa précision est limitée. Il faut tout d'abord transformer la longueur de l'ombre en un angle : en utilisant une méthode graphique, il faut être très soigneux pour obtenir une grande précision. Une table trigonométrique a été incluse par Ptolémée dans l'Almageste mais elle est d'un emploi inconfortable : elle ne donne pas la cotangente nécessaire pour transformer la longueur de l'ombre en un angle, mais quelque chose qui s'apparente au sinus. Son utilisation requiert donc des calculs trop complexes (racines carrées) pour la mesure des latitudes⁽¹⁰⁾. L'on peut même douter que la table éditée récemment soit une copie fidèle de ce qui existait dans l'Antiquité⁽¹¹⁾.

Ajoutons qu'il y a d'autres causes d'erreur : l'ombre de l'extrémité supérieure du gnomon est floue, le diamètre apparent du Soleil étant d'une trentaine de minutes. Par ailleurs, une incertitude concerne le moment exact des équinoxes, car une erreur d'un jour entraîne déjà un écart de latitude d'environ vingt-quatre minutes. Et même en l'absence d'erreur de date, l'on aura encore une dispersion des latitudes de vingt-quatre minutes. En effet, la notion d'équinoxe n'est qu'une approximation : ce n'est pas durant toute la journée où il se produit que le centre du Soleil coupe l'équateur céleste, mais à un moment précis. Si ce moment coïncide avec midi (heure locale) la mesure sera juste, sinon l'erreur induite par la mesure de la posi-

tion du Soleil à la mi-journée pourra atteindre $\pm 12'$.

Des mesures auraient pu être faites à d'autres dates que celles des équinoxes, mais elles auraient requis une bonne connaissance des variations de la déclinaison du Soleil au cours de l'année ; or nous savons que l'inclinaison de l'écliptique n'était connue qu'à quelques dizaines de minutes d'angle près.

Avec les connaissances de l'époque, l'on pouvait atteindre au mieux une précision d'environ un demi-degré pour la mesure des latitudes, ce qui correspond à une incertitude de positionnement d'un lieu quelconque, sur la surface terrestre, d'une cinquantaine de kilomètres, donc trop forte pour permettre des localisations précises. Ceci peut expliquer les critiques injustifiées dont Ptolémée a été l'objet : elles résultent d'une méconnaissance des problèmes de mesure⁽¹²⁾. Il est d'ailleurs regrettable, qu'à ce jour, ses coordonnées n'aient été utilisées que pour des problèmes de localisation d'un intérêt limité⁽¹³⁾.

L'écart-type des différences entre les latitudes connues aujourd'hui et celles de la Géographie est de 2° 2', donc supérieur à ce que l'estimation des causes d'erreurs avait laissé entrevoir : environ un demi-degré. L'histogramme des écarts (donné plus loin) montre cependant que la distribution d'environ la moitié des latitudes correspond à ce que le calcul d'erreur avait laissé prévoir : le savoir-faire de ceux qui ont procédé aux mesures était donc excellent pour l'époque⁽¹⁴⁾. En revanche, pour ce qui est de la deuxième moitié des toponymes, les différences sont trop grandes et leur dispersion n'est pas gaussienne : les écarts les plus importants concernent le Maghreb, où les latitudes sont systématiquement sous-évaluées de plus de 4°. Notons cependant qu'environ deux siècles auparavant, Strabon avait déjà fait pratiquement la même sous-évaluation pour Carthage : il est donc possible que la Géographie de Ptolémée reprenne en cette région d'anciennes valeurs erronées. En Bretagne (l'île), les latitudes sont au contraire fortement surévaluées.

Ailleurs dans l'Empire, des mesures fortement décalées sont souvent mêlées à

Erreurs de latitude en minutes	Ptolémée	Yāqūt	al-Khwarazmi	al-Battani
Moyenne (erreurs systématiques)	46	77	-17	-33
Ecart-type (erreurs aléatoires)	126	167	94	130

d'autres tout à fait valables. Par exemple, dans le Nord-Ouest de la Gaule, à Amiens et à Boulogne-sur-Mer, l'écart dépasse deux degrés, alors qu'à Vermand il n'est que de 8'. Les différences entre les latitudes connues aujourd'hui et celles de la Géographie sont souvent plus faibles pour les grandes villes que pour les petites. Ceci ne signifie pas forcément que les dernières résultent d'interpolations : elles peuvent simplement avoir été mesurées avec moins de soin.

Dès que l'on franchit les limites de l'Empire, les latitudes sont souvent surévaluées⁽¹⁵⁾. Par exemple pour Balkh ou la capitale de la Chine, la surévaluation atteint près de quatre degrés. C'est dans le Sud-Est asiatique que les erreurs sont les plus grandes. Les bouches du Gange sont encore à peu près correctement positionnées, avec une sous-évaluation d'environ quatre degrés, mais plus au sud les coordonnées deviennent fantaisistes. Ainsi la dimension de l'île de Ceylan est beaucoup trop grande : environ quinze degrés du nord au sud alors

qu'en réalité il n'y a qu'un peu plus de trois degrés ; de plus, elle est positionnée dans l'hémisphère sud alors que sa pointe méridionale est à environ six degrés au nord de l'équateur. Plus loin, la disposition des lieux ne correspond nullement à la réalité : les Gréco-Romains ignoraient tout de la péninsule de Malacca et des îles de la Sonde.

Longitudes des toponymes

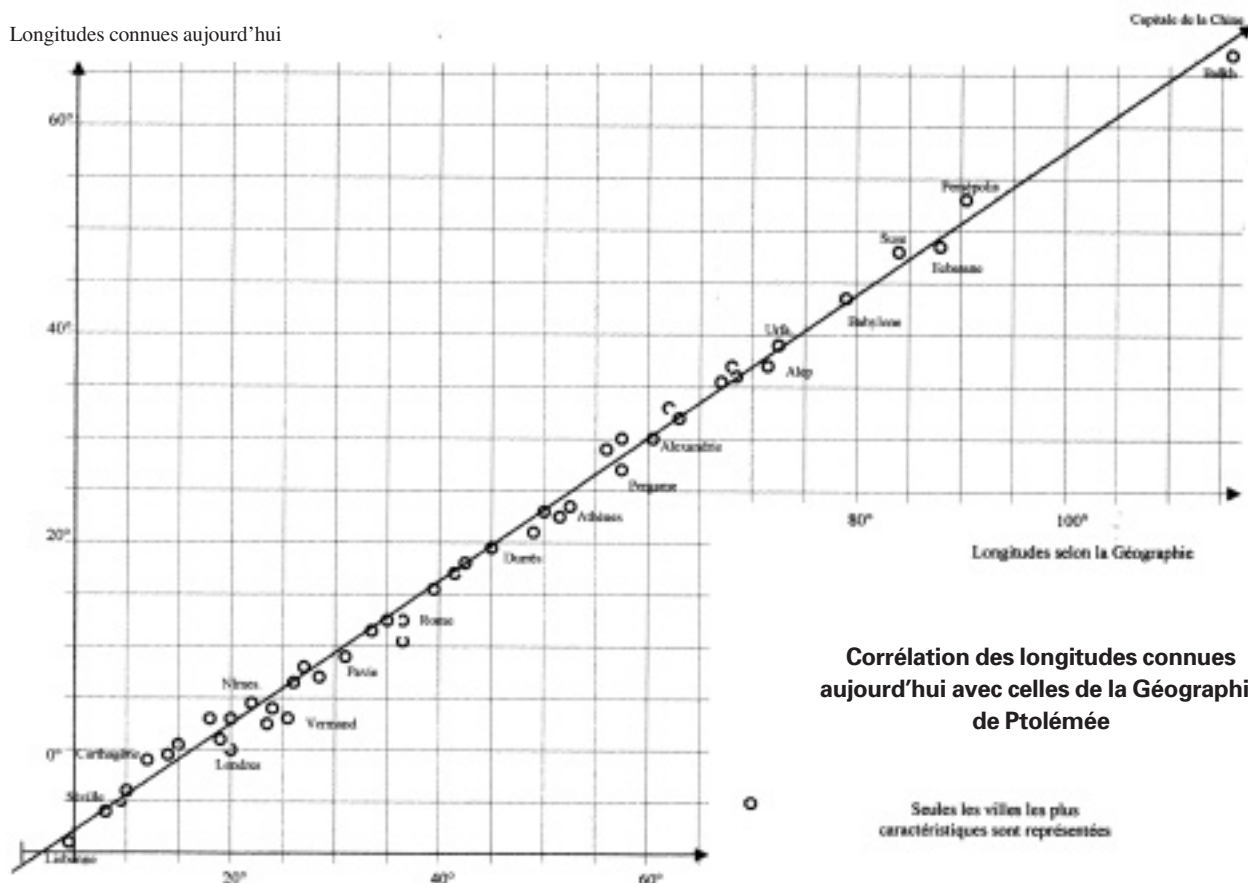
Les longitudes de la Géographie sont manifestement surévaluées, cependant lorsque l'on trace un diagramme donnant, en fonction des longitudes connues aujourd'hui, celles de Ptolémée, l'on constate que les points s'alignent bien. La pente de la droite de régression montre que les longitudes sont surévaluées dans un rapport de 1,47. Ce coefficient permet de mesurer que le méridien zéro des longitudes est à 11° 20' à l'ouest de Greenwich : il ne correspond pas à la ville d'Alexandrie, ce que Ptolémée avait laissé entrevoir. En réalité la liste énumérée dans la

Géographie commence par la description de l'Irlande : les quelques sites mentionnés sont difficilement localisables. Notons cependant que l'îlot le plus occidental, au large de la péninsule de Dingle, est à 10° 39' ouest⁽¹⁶⁾ : il constitue vraisemblablement le point de départ des longitudes de la Géographie⁽¹⁷⁾.

Dans ce qui suit nous admettons que les longitudes de la Géographie ne sont pas accidentellement erronées, mais qu'une cause spécifique a amené une surévaluation de 47 % : notre but est de l'analyser afin de trouver son origine. Nous appellerons longitude *corrigée* celle qui est obtenue en divisant les valeurs de la Géographie par 1,47 et en y retranchant 11° 20' : l'écart de longitude sera calculé en comparant cette dernière valeur à la longitude du lieu connue aujourd'hui.

L'écart-type de ces différences de longitude est de 1° 17' : il est presque deux fois plus faible que celui des latitudes, alors que la mesure des longitudes est a priori plus difficile ! La dispersion des longitudes est si faible qu'elle ne peut

Longitudes connues aujourd'hui





correspondre à ce qu'une simple estimation, faite à partir des connaissances géographiques de l'époque, aurait permis.

En comparant les deux histogrammes, l'on s'aperçoit que la dispersion des longitudes est plus grande, ce qui est normal, mais que c'est l'absence de grands *écarts*, donc de grandes erreurs, qui a réduit l'écart-type. L'exemple type est fourni par le Maghreb : nous avons indiqué par des hachures les mesures correspondantes. Les latitudes sont toujours fortement sous-évaluées, en revanche la dispersion des longitudes est presque normale. En cette région, il est donc probable que la provenance des longitudes est différente de celle des latitudes : les mesures résultent vraisemblablement de deux campagnes différentes.

Ailleurs les anomalies régionales sont moins nettes, des *écarts* plus importants sont souvent intercalés entre des mesures valables. Ceci se produit notamment dans le Nord-Ouest de l'Empire : par exemple à Vermand l'*écart* atteint 2° 53', en revanche il est faible à Cologne, Trèves ou Strasbourg. Les autres *écarts* importants correspondent

à des lieux situés en dehors de l'Empire, notamment à Suse et à Persépolis où ils dépassent également deux degrés. Insistons cependant sur le fait que de tels *écarts* sont faibles, l'on ne fera guère mieux avant le XVIII^e siècle.

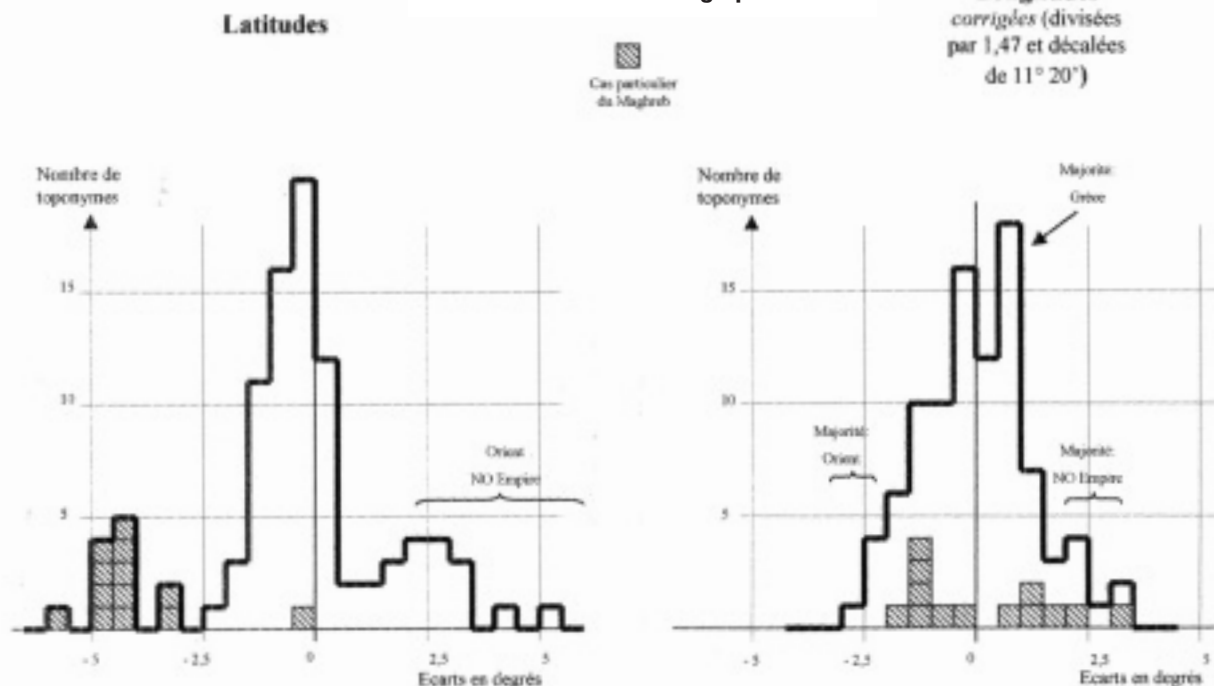
En Grèce, y compris en Ionie, la plupart des longitudes présentent un *écart* compris entre 1/2° et 1°, ce qui dédouble le sommet de l'histogramme. Les latitudes correspondantes ont cependant une distribution tout à fait normale.

Comment les longitudes ont-elles été mesurées ? L'on a souvent évoqué des interpolations, cependant de telles opérations sont complexes et difficiles à réaliser. L'on peut facilement s'en convaincre en analysant les discussions de Strabon quant à la dimension et à la forme de la Méditerranée⁽¹⁸⁾ ; pour le Proche-Orient il en est réduit à des observations oiseuses sur Hipparque ; ailleurs il critique de la même manière Pythéas le Massaliote en prenant à témoin Homère⁽¹⁹⁾, alors que ce dernier n'a jamais fourni la moindre valeur permettant d'en déduire des longitudes. Dans tous leurs ouvrages les géographes gréco-romains montrent qu'ils avaient des connaissances trop insuffi-

santes de l'Empire pour fournir, par interpolation, des coordonnées même très approximatives⁽²⁰⁾ : par exemple ils donnaient une orientation nord-sud aux Pyrénées ! Ajoutons qu'une telle opération réalisée d'après de bonnes cartes s'apparente à un cercle vicieux, puisque les cartes précises à grande échelle sont obligatoirement déduites d'observations astronomiques⁽²¹⁾. Pour contourner cette difficulté, l'on a imaginé que les coordonnées auraient été déduites d'itinéraires⁽²²⁾. C'est aussi peu vraisemblable car :

- de telles interpolations sont encore plus incertaines que celles faites à partir de distances à vol d'oiseau⁽²³⁾ ; contrairement à ce qui est souvent affirmé, les voies romaines étaient fréquemment très sinueuses : la sinuosité globale de tous les itinéraires d'Antonin est de 45 %⁽²⁴⁾ ;
- la plupart des gros *écarts* ne concernent qu'une seule coordonnée, l'autre présentant un *écart* faible ; or les mesures de latitude et de longitude sont indépendantes, puisque faites à des dates différentes (équinoxe ou éclipse). Au contraire, une interpolation fautive devrait plutôt entraîner une erreur concernant les deux à la fois ;

Histogramme des écarts entre les coordonnées connues aujourd'hui et celles de la Géographie



- une telle opération ne déforme pas les longitudes par rapport aux latitudes ;
- la succession des toponymes à l'extérieur de l'Empire exclut cette hypothèse (voir plus loin) ;
- aucun itinéraire décrivant des routes de pays situés à l'extérieur de l'Empire romain, hormis celles de l'Inde⁽²⁵⁾, ne nous est parvenu, ou n'a été évoqué par les anciens. En ce qui concerne la Table de Peutinger (qui ne constitue pas un itinéraire) il est invraisemblable qu'elle ait pu être à l'origine de la Géographie⁽²⁶⁾.

Selon Ptolémée les longitudes peuvent être déduites de l'observation des éclipses⁽²⁷⁾. Effectivement, si l'on admet qu'une éclipse peut être observée simultanément depuis différents lieux, il suffit de mesurer, lors d'une telle occurrence, la position angulaire d'un astre dans le sens est-ouest. La longitude aurait aussi pu être déduite de l'heure locale de l'éclipse, cependant cette méthode aurait entraîné des incertitudes supplémentaires.

Deux types d'éclipses peuvent être observés sans instruments astronomiques : celles dites de Lune et celles dites de Soleil. Il ne faut pas s'en tenir à une traduction stricte du terme utilisé par Ptolémée car le sens des expressions a pu évoluer entre-temps ; nous verrons plus loin qu'il n'est même pas certain que Ptolémée ait été à l'origine de la collecte des coordonnées. Notons que, selon Strabon, les deux types d'éclipses auraient été utilisées à l'époque pour mesurer les longitudes⁽²⁸⁾.

Les éclipses de Lune se produisent lorsque cet astre entre dans le cône d'ombre de la Terre. Ces éclipses sont trop lentes et surtout l'ombre de la Terre n'est pas assez nette pour pouvoir noter avec précision les instants du phénomène et permettre d'en déduire des différences de longitude. Une erreur d'une demi-heure correspond déjà à une erreur de longitude de 7° 30'. Il est donc invraisemblable que l'on se soit servi des éclipses de Lune pour établir les longitudes consignées dans la Géographie avec la précision que nous avons relevée. Ajoutons que de telles observations n'entraînent pas de surévaluation des longitudes. Qui plus est, la mesure de la position des astres est difficile car ces éclipses

ne sont observables que la nuit : il faut donc, soit noter précisément l'heure locale de leur occurrence, soit relever la position exacte des étoiles, ce qui en l'absence d'instruments astronomiques est difficile.

Pour un observateur terrestre, lors d'une éclipse de Soleil, c'est la Lune qui occulte le Soleil. Une telle éclipse est plus rapide qu'une éclipse de Lune et surtout les début et fin du phénomène sont observables d'une façon précise car les bords de la Lune sont nets. Comme elle est observée de jour, l'on peut se contenter de suivre l'ombre d'un gnomon pour mesurer la position angulaire du Soleil, sans outillage plus perfectionné. En un lieu, les éclipses de Soleil sont plus rares que les éclipses de Lune ; qu'elles soient partielles ne constitue pas un inconvénient⁽²⁹⁾ : au contraire cela peut faciliter la mesure de la position angulaire du Soleil, au moment adéquat, au moyen d'un gnomon.

Manifestement les hommes de l'époque ignoraient que les éclipses de Soleil ne sont pas observables partout au même moment : par suite de la rotation de la Lune autour de la Terre, le cône d'ombre se déplace rapidement. Cependant la vitesse de balayage est affectée par plusieurs causes importantes, notamment par la rotation de la Terre sur son axe qui se fait dans le même sens que l'éclipse, ainsi que par la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon. Les calculs théoriques sont complexes. Nous préférons pour notre part, renvoyer le lecteur à l'article suivant de Robert Vincent qui montre qu'en adoptant la méthode utilisée au temps de Ptolémée, les longitudes déduites des heures de passage de l'éclipse de Soleil du 11 août 1999 présentent exactement la même surévaluation que celle déduite des longitudes mentionnées dans la Géographie. Ceci montre que ce sont certainement des éclipses de Soleil qui ont été utilisées pour mesurer les longitudes.

La mesure des longitudes au moyen de l'observation des éclipses semble intuitive, mais elle a toujours suscité des difficultés. Il est intéressant d'analyser la dernière tentative faite en ce sens. Au XVIII^e siècle, l'emploi de lunettes astro-

nomiques avait permis de découvrir les éclipses des satellites de Jupiter, qui sont fréquentes, rapides et visibles sur toute la Terre en même temps. Elles auraient donc dû permettre une mesure précise des longitudes ; cependant l'on a constaté que leur périodicité fluctuait d'environ un quart d'heure. Olaus Römer a attribué ces fluctuations au temps mis par la lumière pour nous parvenir, lequel est variable selon les positions respectives des deux planètes. Il a été le premier à montrer que la lumière ne se propage pas instantanément.

Depuis lors l'on n'utilise plus les éclipses, quelles qu'elles soient, pour mesurer les longitudes⁽³⁰⁾ ; celles-ci ont été mesurées au moyen de chronomètres de marine (John Harrison vers 1760) qui gardent le temps du méridien d'origine avec précision, durant des semaines, voire des mois.

Dans l'Antiquité les clepsydes, ou autres instruments servant à mesurer le temps, étaient beaucoup trop imprécis. Le changement de la méthode utilisée pour mesurer les longitudes explique certainement pourquoi la principale cause d'erreur, affectant les valeurs données par Ptolémée, n'a pas été décelée : ceux qui connaissaient ces problèmes ne se sont guère souciés des coordonnées contenues dans la Géographie de Ptolémée et les historiens qui s'y sont intéressés ne se sont pas suffisamment préoccupés des problèmes astronomiques...

Une seule éclipse de Soleil n'a pas pu couvrir toute la zone décrite dans la Géographie, vraisemblablement plusieurs éclipses ont été utilisées. Une analyse systématique des coordonnées permettrait certainement de découvrir bien des points intéressants, mais il s'agit là d'un travail énorme qui dépasse notre objectif et nos moyens. Ajoutons que ce travail doit se faire impérativement à partir d'une bonne édition critique de la Géographie, car les anciennes éditions soulèvent trop de problèmes : les reproches que certains de leurs auteurs se sont mutuellement adressés constituent un bon indice à cet égard⁽³¹⁾. Nous nous contenterons donc d'examiner le problème de la provenance des coordonnées.

Provenance des coordonnées

La succession des toponymes dans la Géographie n'est pas aléatoire : dans l'Empire ils suivent souvent des routes qu'il est ainsi possible de retracer ; notons que si leur tracé semble erratique, la direction moyenne est correcte. Ceci confirme que les coordonnées proviennent de véritables mesures car, si elles avaient été le résultat d'interpolations, le tracé serait plus "lisse" mais avec une direction moyenne aléatoire. En revanche, en Orient, la succession des toponymes est différente : elle correspond à un balayage de chaque pays, approximativement dans le sens ouest-est, dont le meilleur exemple se trouve au chapitre 20 du livre VI. Il est peu vraisemblable que cette différence ait une origine rédactionnelle : elle résulte vraisemblablement d'une méthodologie de mesure différente selon le pays. Vouloir attribuer toutes les coordonnées à un seul auteur semble inadéquat.

En tout état de cause la mesure des coordonnées consignées dans la Géographie a constitué un travail colossal. Déjà pour les latitudes il aurait fallu de nombreux siècles à une seule équipe pour réaliser un tel travail⁽³²⁾.

La mesure des longitudes à partir des éclipses a dû mobiliser énormément de monde, car il fallait être simultanément présent dans toutes les localités concernées lors des éclipses. Ptolémée n'a donc pas pu mesurer lui-même toutes les coordonnées qu'il mentionne. Même si seule la position de quelques lieux avait été mesurée, les autres coordonnées résultant d'interpolations, ceci ne modifierait guère le problème : par exemple, en se contentant de ne relever que 10 % des longitudes, il lui aurait fallu disposer d'environ un millier d'équipes de disciples ! Qui plus est, il fallait que ces hommes soient des experts, car mesurer très précisément la position du Soleil n'est pas à la portée du premier venu. Ajoutons que, lors de l'éclipse, le ciel risquait d'être voilé : il fallait donc tout recommencer à l'occasion d'une nouvelle éclipse...

En dehors de toute considération concernant les énormes moyens requis

et le coût de telles opérations, il faut bien se rendre compte qu'elles n'ont pas pu passer inaperçues : l'on peut dans une certaine mesure les comparer à celles qui ont abouti, au XVIII^e siècle, à la réalisation de la première carte détaillée et complète de la France.

Son auteur, Cassini, a écrit⁽³³⁾ : *"Pouvait-on espérer qu'un ouvrage de si longue haleine, qui devait être traversé par tant d'obstacles de différents genres, put être achevé ? Non, sans doute, et il ne fallait rien de moins que la protection et la magnificence du Roi pour oser seulement le tenter"* Plus loin il évoque *"les oppositions et les insultes de la part des habitants"* Nous ne pensons pas que la mesure des coordonnées consignées dans la Géographie résultaient d'un ordre impérial car, en ce cas, Ptolémée aurait cité le prince qui l'aurait commandité⁽³⁴⁾. Cependant un tel travail a dû requérir une autorisation du plus haut niveau, pourtant aucun texte antique ne fait allusion à une opération de cette envergure.

Plus étonnant, comment Ptolémée s'est-il procuré les coordonnées relatives aux lieux situés en dehors de l'Empire ? Généralement, l'on pense que des commerçants grecs auraient pu les lui fournir ; pour l'Asie centrale le nom du Macédonien Maës Titianus a été avancé⁽³⁵⁾. C'est cependant peu probable, car un commerçant n'aurait guère eu les connaissances nécessaires pour faire des observations astronomiques avec la précision que nous avons constatée⁽³⁶⁾. De plus, ne pouvant parcourir que quelques itinéraires, il aurait été incapable de fournir des données concernant l'ensemble d'une vaste région. Plus, comment aurait-il pu être présent dans les divers lieux pour faire des mesures le jour de l'éclipse ?

Ajoutons finalement que des étrangers, donc des hommes a priori suspects, n'auraient guère pu se livrer à des observations astronomiques sans susciter de la méfiance ; il est aussi peu vraisemblable qu'ils se seraient contentés de transmettre les valeurs : quel commerçant sensé aurait accepté de transporter des listes mystérieuses dont il aurait eu le plus grand mal à expliquer la teneur au premier poste de

contrôle rencontré⁽³⁷⁾. De toute façon, ce travail de courrier n'expliquerait en rien la provenance des coordonnées...

Il a certainement fallu une certaine forme de coopération entre plusieurs pays. En ce qui concerne l'Inde, nous disposons de quelques informations : le roi Rudradâman I, qui a régné à l'époque de Ptolémée, de 130 à 160, s'est intéressé aux problèmes astronomiques. C'est à cette époque que des savants hindous auraient fait des progrès notables, ce qui leur aurait permis de comprendre l'origine des éclipses et de les prévoir ; c'est alors que l'on aurait commencé à mesurer les longitudes⁽³⁸⁾.

En ce qui concerne la Chine, la Géographie mentionne une "capitale" sans nom propre dont la longitude corrigée est de 109° 49', ce qui correspond bien à l'antique capitale Xi'an (108° 52'). Cependant, à cette époque, Luoyang l'avait remplacée⁽³⁹⁾ et sa longitude, de 112° 26', correspond moins bien. En ce qui concerne la latitude de cette "capitale", elle correspond dans les deux cas à une surévaluation d'environ quatre degrés, ce qui est proche de la valeur relevée pour d'autres villes orientales. Pourquoi cette "capitale", certainement une grande ville, n'a-t-elle pas de nom propre ? Il est également curieux que la Chine soit divisée en deux : la première partie, située au nord-ouest de cette "capitale", est décrite dans le livre VI, alors que l'autre partie n'est décrite que dans le livre VII. Il convient donc de se demander si le relevé n'aurait pas été fait à une période où ce pays était morcelé.

Le seul cartographe connu en Chine, à des dates aussi reculées, est Pei Xiu. Il a vécu au temps des Jin occidentaux, une époque où ce pays était divisé, ce qui expliquerait la scission de la Chine entre les livres VI et VII. Dans le domaine qui nous occupe nous ne savons pratiquement que deux choses : Pei Xiu aurait réalisé une carte, perdue par la suite. Il a énoncé six principes selon lesquels une bonne carte doit être réalisée mais n'a pas cru nécessaire de les expliquer en détail, comme Ptolémée l'a fait dans son premier livre ; il écrit néanmoins qu'elle doit respecter les droites et les angles.

L'approche du savant chinois semble plus pragmatique et en opposition avec celle de Ptolémée.

En comparant leurs écrits l'on a l'impression d'assister à une véritable querelle d'érudits. Malheureusement Pei Xiu a vécu environ un siècle trop tard, car il n'aurait formulé ses principes qu'en 267⁽⁴⁰⁾. L'on peut cependant émettre plusieurs hypothèses :

- il y aurait une erreur de chronologie concernant la Chine ou l'Occident : c'est l'hypothèse la moins vraisemblable, les datations de Pei Xiu et de Ptolémée semblant bien assurées ;
- Pei Xiu se serait simplement approprié les travaux de savants chinois antérieurs, mais ceci n'explique pas la scission de la Chine entre les livres VI et VII, car au II^e siècle la Chine constituait un empire unitaire ;
- Ptolémée aurait seulement rédigé le premier livre ; les livres numérotés de II à VII n'auraient été inclus que plus tard dans la Géographie, peut-être justement à l'époque de Pei Xiu. Cette hypothèse a l'avantage d'expliquer bien des choses, notamment la mauvaise relation entre le premier livre et ceux comportant les coordonnées, les discordances entre les cartes et les coordonnées, etc.

Après les épisodes de Pei Xiu, Ptolémée et Rudradâman I, l'on n'entreprendra plus de tels travaux. Le motif qui a provoqué, un demi-millénaire plus tard, un renouveau d'intérêt des géographes arabes pour de telles opérations est facile à saisir : certains califes étaient attirés par la géographie. Ensuite, il faudra encore attendre des siècles avant que des recherches soient entreprises dans le domaine cartographique, en Chine comme en Inde. Et il faudra attendre encore plus longtemps, pour qu'en Occident des coordonnées soient mesurées.

Le rôle de Ptolémée

La concordance temporelle des travaux cartographiques entrepris dans l'Empire romain, en Inde et en Chine, montre qu'il y a certainement eu collaboration entre ces pays, mais nous n'avons aucune information concer-

nant la forme qu'elle a pu prendre. Le seul point connu est qu'en Inde comme en Chine, le gouvernement était directement impliqué dans le projet : Rudradâman I était roi et Pei Xiu ministre des travaux. Plus récemment, chez les Musulmans, la réédition des listes de toponymes avec coordonnées était commanditée par le prince. Ptolémée fait exception.

Nous sommes donc amenés à envisager l'hypothèse que Ptolémée ne soit pas l'auteur des livres comportant les coordonnées : nous avons déjà vu qu'il y a peu de relation entre ceux-ci et le premier livre de la Géographie qui, lui, est certainement l'œuvre de Ptolémée. L'on a peut-être ajouté, après la mort du savant alexandrin, les listes de toponymes avec coordonnées pour assurer leur pérennité ; sans cette précaution elles auraient probablement disparu, comme en Chine et en Inde. Il est en effet rarissime que des données chiffrées des anciens temps nous soient parvenues.

La qualité des coordonnées contenues dans les livres de la Géographie, numérotés de II à VII, sont d'une précision surprenante pour l'époque, souvent à la limite de ce qu'il était possible d'obtenir. De surcroît, leur quantité est impressionnante. Qui les a mesurées ? En ce qui concerne la réalisation des spectaculaires aqueducs romains, Frontin révèle que leur gestion était entièrement confiée à des esclaves ; parachuté à la tête de ce service par l'empereur il était le seul homme libre, mais il avoue n'avoir aucune compétence en ce domaine⁽⁴¹⁾ !

Nous ne savons rien du système éducatif qui formait ces esclaves-spécialistes ; en revanche, nous connaissons relativement bien celui des aristocrates. Dans son Apocoloquintose du divin Claude, Sénèque met en exergue les mérites de ce système ; le résultat, et pas seulement en ce qui concerne l'éducation de Néron, nous laisse dubitatifs : ce n'est certainement pas ainsi que l'on formait les esclaves-spécialistes de haut vol ! Ailleurs Sénèque écrit⁽⁴²⁾ : *"Rappellerai-je la notation par signes abrégatifs (notes tyronniennes), qui enregistre instantanément le discours le plus rapide et permet à la main de s'adapter à la célérité de la parole ?*

Les plus vils esclaves ont fourni ces trouvailles. La sagesse a son siège plus haut. Elle n'instruit pas les doigts... Elle n'est pas ouvrière de l'outillage, qui répond aux nécessités de l'existence." Son trait peut concerner les esclaves de Frontin, mais plus sûrement ceux qui ont si bien mesuré les coordonnées. Pourtant, l'évolution du monde résulte plus souvent de travaux fastidieux que d'idées brillantes d'hommes célèbres, fussent-ils Sénèque, ou Ptolémée dont les travaux sont restés sans suite dans le domaine de la cartographie⁽⁴³⁾. La poursuite de l'étude des rares chiffres qui nous sont parvenus, telles les coordonnées de la Géographie (ou les distances des itinéraires analysés dans notre précédent ouvrage), peut nous apprendre bien plus en ce domaine que l'analyse des ouvrages traditionnellement abordés. Espérons que nos recherches rendront aux livres, numérotés de II à VII, de la Géographie attribuée à Claude Ptolémée, un peu de l'intérêt requis pour un tel travail. ●

Contact

Pierre HERRMANN

Ingénieur CNAM, retraité

Références

- (1) Les risques de confusion entre les divers homonymes sont nombreux le long des voies romaines. Cf. Pierre Herrmann, *Itinéraires des voies romaines*, de l'Antiquité au haut Moyen Age ; Errance, Paris, 2007 ; page 64.
|| Strabon, Géographie ; Livre IX, 2, 23 révèle qu'il en allait de même en Grèce. En Orient les doublons sont fréquents.
- (2) Nous avons utilisé les coordonnées fournies par le logiciel Encarta de Microsoft, version 5.0.
- (3) Konrad Miller, *Mappae Arabicae* ; Wiesbaden, 1926/1986 ; page 8.
|| Lelio Pagani, *Cosmographie de Claude Ptolémée* ; Orsamaggiore, 1990 ; page V. || Pierre Sillières, *Les voies de communication de l'Hispanie méridionale* ; Paris, 1990, page 180.
|| G. J. Toomer, *Dictionary of scientific biography* ; New York, 1981 ; terme Ptolemy, page 200, etc.



- (4) La dernière édition complète est celle de Nobbe datant de 1843.
- (5) J. Honigmann, *Pauly's Realencyclopædie* ; München ; terme Marinos von Tyr, col. 1768 : premier tiers du II^e siècle.
- (6) Vitruve, *De l'architecture* ; Livre IX, VII 1 : Athènes, 3/4 soit 36° 53' au lieu de 37° 59' ; Rhodes, 5/7 (35° 32') au lieu de 36° 25'. || Strabon, *Géographie* ; Livre II, 5, 37 : Alexandrie, 5/3 (30° 58') au lieu de 31° 11' ; Carthage 11/7 (32° 29') au lieu de 36° 53'...
- (7) Les toponymes sont écrits en arabe alors que Ptolémée les donne en Grec. Cependant ceci n'explique pas toutes les différences. Sans doute les Grecs ont-ils rebaptisé nombre de villes comme le feront les conquérants arabes plus tard...
- (8) Coordonnées publiées dans : Gerald R. Tibbetts, dans J. B. Harley & D. Woodward, *The history of cartography*, Vol. 2, Book 1 ; Chicago, 1992 ; page 99.
- (9) L. Gallois, *Recueil des travaux de l'Institut de géographie alpine* ; 1918, tome VI, fasc. 1 ; page 15.
- (10) Pour obtenir la cotangente, il faut calculer la racine carrée de $(1/\sin^2 x - 1)$. De tels calculs étaient pratiquement impossibles avec les moyens de l'époque.
- (11) G. J. Toomer, *Ptolemy's Almagest* ; Princeton, 1998 ; pages 57, etc., publie une table. On peut admettre qu'elle donne les sinus si l'on procède comme suit : l'angle en degrés doit être multiplié par deux, il figure alors dans la première colonne intitulée "arc" ; le sinus est obtenu en divisant le chiffre de la première colonne "chord" par 120, celui de la seconde colonne de "chord" par 60*120 et celui de la dernière par 3600*120 et que l'on additionne le tout. Les intervalles de la table correspondent à des pas de 15'. L'écart entre les chiffres publiés par Toomer et ceux des tables trigonométriques modernes est infime (inférieur à 1,3*10⁻⁶) ce qui donne l'impression que Ptolémée disposait d'une table incommode, mais exacte. Cependant le livre de Toomer n'est pas clair et il semble dire que la table qu'il publie résulte d'une "computation" : elle ne refléterait donc pas les chiffres disponibles dans l'Antiquité, ce qui expliquerait les erreurs incroyablement faibles. || Pour calculer réellement le sinus, il faut connaître π avec une précision suffisante et être capable de calculer une série en $x - x^3/3! + x^5/5! - x^7/7!...$ Les sinus disponibles dans l'Antiquité résultaient certainement de simples approximations graphiques, c'est d'ailleurs ce que laisse entendre Ptolémée par la suite...
- (12) Notons que des critiques semblables ont été adressées aux itinéraires romains alors que là aussi il faudra attendre le XIX^e siècle pour faire aussi bien.
- (13) Raymond Chevalier, *Les voies romaines* ; Paris, 1972 ; page 24 : de telles études ne relèveraient le plus souvent que d'un "patriotisme de clocher".
- (14) Cordoue : 38° 05' pour 37° 53' ; Narbonne : 43° 15' pour 43° 11' ; Rome : 41° 40' pour 41° 53', etc. Notons que les écarts sont inférieurs à 20' pour : Cologne, Strasbourg, Vermand : Carthagène, Lérida, Marseille, Saragosse ; Crotone, Rimini ; Egine, Ephèse, Pergame ; Adana, Beyrouth, Pétra, Tanis...
- (15) Dans l'Empire l'on note les écarts suivants : Beyrouth -13', Antioche -41', Baalbek -20'. Plus loin : Babylone 147', Suse 124' Persépolis 205', etc.
- (16) La Géographie mentionne dans les îles britanniques un "cap boréal" dont la longitude corrigée est située à 3° 20' ouest et à une latitude de 61°, or l'îlot le plus septentrional des îles Shetland est à 53' ouest et 60° 51' : la correspondance est bonne.
- (17) Il s'agit certainement d'une simple donnée arbitraire prise en compte dans les calculs afin d'éviter des chiffres négatifs. Notons que la côte marocaine se prolonge plus vers l'occident ; ajouté aux mesures relativement erronées des villes du Maghreb, ceci montre que les rédacteurs de la Géographie avaient une mauvaise connaissance de cette région.
- (18) Strabon, *Géographie* ; livre II, I, 40 : place Carthage et le détroit de Sicile sur le même méridien alors que la direction entre les deux sites n'est pas nord-sud mais plutôt est-ouest ! Il se rend compte des énormes approximations puisqu'il écrit : "*L'évaluation des distances, visiblement fautive la plupart du temps, révèle une extrême*
- ignorance des lieux... Mais quand l'écart porte sur 4000 stades, l'erreur est inévitable (sic).*"
- (19) Strabon, *Géographie* ; Livre VII, 3, 6 : "*dépasser toute mesure comme ils (Eratosthène et Apollodore) le font, surtout à propos d'Homère, mérite à mon sens, d'être sévèrement condamné...*" || Pourtant ce que prétend Pythéas semble plus vraisemblable que ce que Strabon écrit...
- (20) Pourtant de nos jours l'on affirme souvent le contraire. Par exemple Honigmann (RE, terme Marinos von Tyr), col. 1792, trouve "*selbstverständlich dass (Marin de Tyr) in weitgehendem Masse amtliches römisches Kartenmaterial benutzt hat.*"
- (21) Ptolémée, *Géographie* (traduction de l'abbé Halma) ; Paris 1828/1989 ; page 49 : la "*connaissance des distances ne suffit pas pour tracer une carte, il faut connaître les latitudes et les longitudes.*"
- (22) Raymond d'Hollander, *Sciences géographiques dans l'Antiquité* ; AFT, 2002 ; page 379.
- (23) Strabon évalue quelques distances à vol d'oiseau à partir d'itinéraires puisqu'il ajoute "*si l'on supprime les irrégularités de tracé de la route*" (cf. *Géographie* ; livre II, 4, 4). Cependant il reste prudent : "*on s'accorde aujourd'hui à penser que...*".
- (24) Pierre Herrmann, *Itinéraires des voies romaines, de l'Antiquité au haut Moyen Age* ; Paris, 2007 ; pages 113, etc. Les distances des itinéraires où la lieue a pu servir d'unité de mesure ont été exclues.
- (25) Strabon, *Géographie* ; Livre XV, 1, 50. || Hérodote a brièvement décrit la route perse de Sardes à Suse, mais à l'époque de la rédaction de la Géographie elle avait certainement disparu depuis plus d'un demi-millénaire...
- (26) Dans une certaine mesure la zone représentée par la Table de Peutinger correspond à celle détaillée dans la Géographie, mais elle est moins vaste et contient beaucoup moins de toponymes. Notons aussi qu'en dehors de l'Empire ils diffèrent considérablement. Qui plus est, la surévaluation des longitudes de la Table est très variable d'un endroit à l'autre.



- Cf. Pierre Herrmann, *Itinéraires des voies romaines, de l'Antiquité au haut Moyen Age* ; Errance, Paris, 2007 ; page 184.
- (27) Ptolémée, *Géographie*, I, IV. || Même affirmation de Héron d'Alexandrie, Dioptra XXXV.
- (28) Strabon, *Géographie* ; Livre I, I, 12.
- (29) Le diamètre de l'ombre projetée sur la Terre atteint au maximum 270 km.
- (30) Rare exception : Alexandre de Humboldt, *L'Amérique espagnole* en 1800 ; Paris, 1965/1990 ; page 46.
- (31) La plupart des éditions ont été faites en latin, alors que l'original est en grec !
- (32) Pierre Herrmann, *Itinéraires des voies romaines, de l'Antiquité au haut Moyen Age* ; Paris, 2007 ; page 141.
- (33) Cassini de Thury, Avertissement ou introduction à la carte générale et particulière de la France, pages 4 et 9.
- (34) Il a dédié la plupart de ses ouvrages à un Syrus qui reste pour nous un inconnu.
- (35) E. Chavannes, *Les pays d'Occident d'après le Heou Han Chou* ; Leyde, 1907 ; page 4. Une rencontre entre la troupe chinoise de Kan Ying (lieutenant de Pan Tch'ao), envoyée en 97 en mission vers le Golfe Persique, et une caravane de Maës Titianus, est possible, mais pourquoi Kan Ying aurait-il amené une liste de coordonnées et l'aurait-il donnée au Macédonien, alors qu'il devait explorer l'empire parthe ? || David Pingree, *Astronomy and Astrology in India and Iran* ; Isis, 1963, 54 ; page 234, évoque seulement la diaspora hellénistique.
- (36) Ptolémée, *Géographie* ; traduction de l'abbé Halma, Paris 1828/1989 ; pages 30 et 31.
- (37) Strabon, *Géographie* ; Livre II, 3, 5 : "il n'était pas possible sans ordre de mission de sortir d'Alexandrie par mer... étant donné l'importance de la garde qui fermait le port et toutes les issues (nous avons pu le constater par nous-mêmes pour ce qui en subsiste encore aujourd'hui, pendant l'assez long séjour que nous avons fait à Alexandrie)."
- (38) Joseph E Schwartzberg, *The history of cartography* ; Chicago, 1994 ; Vol II, Book II, page 315 : Ujjain - la capitale de Rudradâman I - aurait été choisie comme point de départ des mesures.
- (39) Le Heou Han Chou (*Chavannes, Les pays d'occident d'après le Heou Han Chou* ; Leyde, 1907 ; pages 25, 43, etc. donne les distances toujours à Luoyang. || Ptolémée, *Géographie* ; traduction de l'abbé Halma, Paris 1828/1989 ; page 31 : les commerçants auraient évalué la distance à 36 200 stades ce qui correspond à la route dite de la soie ; Ptolémée trouve cette distance excessive et la réduit de moitié ! Comme tant d'autres indices, ceci montre que les coordonnées ne résultent pas de son travail.
- (40) Ed. Chavannes, *Les deux plus anciens spécimens de la cartographie chinoise* ; BEFEO ; 1903 III ; page 242, etc. || Cordell D. K. Yee, *The history of cartography* ; Chicago, 1994 ; Vol II, Book II, page 110.
- (41) Frontin, *Les aqueducs de Rome* ; voir par exemple, II & CV.
- (42) Sénèque, *Lettres à Lucilius*, 90, 25 à 27.
- (43) Les géographes musulmans se contenteront de schémas simplistes inspirés de ceux conçus par les Babyloniens un millénaire avant Ptolémée. Voir Konrad Miller, *Mappae Arabicae* ; Wiesbaden 1926/1986. || Raymond d'Hollander, *Sciences géographiques dans l'Antiquité* ; AFT, 2002 ; page 401 : les projections évoquées par Ptolémée n'auraient été utilisées en Occident qu'entre 1406 et 1570...

ABSTRACT

The coordinates mentioned in Ptolemy's Geography were measured and not estimated, as usually assumed. The analysis of the latitudes indicates a correct precision, according to the means available at that time. The longitudes have a good linear correlation with reality: the origin is 11° 20' west of Greenwich; the overestimation is 47 %. The examination of the measurement means points out that they were deducted from the observation of a solar eclipse: obviously the author of the Geography ignored that they do not occur everywhere at the same time, this explains fully the longitudes overestimation. For example a computation deducted from the eclipse which occurred in 1999 August 11th shows that the overestimation is the same as the one deducted from the Geography's longitudes: this validates fully our hypothesis. The coordinates measurement requested an enormous work: several evidences indicate that it requested even some international cooperation (China, India, Rome). Moreover Ptolemy was probably not involved in the work related to the coordinates measurements, the different data were certainly included in the Geography after his death.

ZUSAMMENFASSUNG

Die in der Geographie von Claudius Ptolemeus zusammengestellten Koordinaten sind das Resultat von Messungen und nicht Schätzungen wie bis jetzt üblich angenommen wurde. Die Analysis der Methoden die damals verfügbar waren, zeigt dass die Genauigkeit der Breitenangaben gut ist. Die Korrelation der Längenangaben mit den heutigen Daten ist geradlinig: Der Ausgangspunkt ist 11° 20' westlich von Greenwich; die Überschätzung ist 47 %. Die Untersuchung der damals verfügbaren Messmöglichkeiten zeigt dass die Länge von Sonnenfinsternisbeobachtungen abgezogen wurden: Offenbar wusste aber der Verfasser der Geographie nicht dass sie nicht überall zur gleichen Zeit vorkommen, was die Längenüberschätzung gut erklärt. Als Beispiel zeigt die Sonnenfinsternis die am 11^{ten} August 1999 vorkam genau die gleiche Überschätzung als die in den Längenangaben der Geographie vorhanden ist: dies bestätigt völlig unsere Annahme. Die Koordinatenmessungen forderten eine riesige Menge von Arbeit: Mehrere Merkmale zeigen dass sie höchstwahrscheinlich eine internationale Zusammenarbeit bedingten (China, Indien und Rom). Claudius Ptolemeus hat sehr wahrscheinlich bei diesen Messungen nicht mitgewirkt, die Koordinaten wurden sicherlich nur nach seinem Tod in seine Geographie eingefügt.

Vérification probante de l'hypothèse de la détermination des différences de longitude par l'observation des éclipses de Soleil au temps de Ptolémée

Application à l'éclipse du 11 août 1999

■ Robert VINCENT

L'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999 est particulièrement intéressante car elle a balayé la zone Europe Moyen-Orient privilégiée par la Géographie de Ptolémée. L'analyse de ses éphémérides permet d'illustrer et de conforter l'hypothèse émise par Pierre Herrmann (voir article précédent) sur l'utilisation, au temps de Ptolémée, des éclipses de Soleil pour la détermination des différences de longitude. En effet, les deux caractéristiques étonnantes des longitudes de Ptolémée qui ont été mises en évidence dans l'argumentaire de Pierre Herrmann : la constance de leur surévaluation de 47 % dans toute l'étendue de la Géographie et leur précision caractérisée par un très faible écart-type de 1°17', vont être retrouvées dans l'étude de cette éclipse de Soleil.

La surévaluation de 47 % de ces différences de longitude constatée dans la Géographie de Ptolémée, s'explique en admettant que la différence des longitudes entre deux lieux était confondue avec la différence des heures locales d'observation du milieu d'une éclipse de Soleil, ce qui revient à conclure en la croyance à l'époque, en la simultanéité d'une éclipse de Soleil en tous lieux, à l'instar des éclipses de Lune.

Ce faisant, la différence des longitudes entre deux lieux était faussée – augmentée car une éclipse de Soleil se déplace d'ouest en est – du temps mis par l'éclipse pour se propager entre ces deux lieux.

Dans le tableau ci-dessous, sont indiqués, pour un certain nombre de villes :

- la latitude,
- la longitude en degré et en temps,
- l'heure du milieu de l'éclipse du 11 août 1999, en temps universel (TU),

En interlignes et en italique, entre les villes successives :

- les différences de longitude, exprimées en minutes de temps (a),
- les différences entre les heures du milieu de l'éclipse (b),

Lieux	Latitude		Longitude			milieu éclipse TU	quotient
	degrés		degrés	h	mn s	h mn s	%
				<i>a</i>			<i>100 b/a</i>
Plymouth	50°23'		- 4°09'	-	16mn 36s	10h 13mn 42s	
					<i>10mn 16s</i>	<i>3mn 24s</i>	33
Cherbourg	49°40'		- 1°35'	-	6mn 20s	10h 17mn 06s	
					<i>10mn 36s</i>	<i>3mn 54s</i>	37
Dieppe	49°54'		1°04'		4mn 16s	10h 21mn 00s	
					<i>11mn 52s</i>	<i>4mn 30s</i>	38
Reims	49°15'		4°02'		16mn 08s	10h 25mn 30s	
					<i>14mn 52s</i>	<i>6mn 00s</i>	41
Strasbourg	48°35'		7°45'		31mn 00s	10h 31mn 30s	
					<i>15mn 20s</i>	<i>6mn 42s</i>	43,7
Munich	48°09'		11°35'		46mn 20s	10h 38mn 12s	
					<i>5mn 52s</i>	<i>2mn 36s</i>	44,3
Salzbourg	47°48'		13°03'		52mn 12s	10h 40mn 48s	
					<i>14mn 20s</i>	<i>6mn 48s</i>	47,5
Szombathely	47°14'		16°38'	1h	06mn 32s	10h 47mn 36s	
<i>Hongrie</i>					<i>37mn 48s</i>	<i>19mn 18s</i>	51
Bucarest	44°26'		26°05'	1h	44mn 20s	11h 06mn 54s	
					<i>9mn 48s</i>	<i>5mn 30s</i>	56
Shabla	43°31'		28°32'	1h	54mn 08s	11h 12mn 24s	
<i>Bord Mer Noire</i>					<i>29mn 52s</i>	<i>16mn 36s</i>	55,5
Turhall	40°30'		36°	2h	24mn	11h 29mn	
<i>Turquie</i>					<i>124mn</i>	<i>56mn</i>	45
Karachi	25°		67°	4h	28mn	12h 25mn	

Lieux	Latitude	Longitude		milieu éclipse TU	quotient
	degrés	degrés	h mn s	h mn s	%
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>100 b/a</i>
Dieppe	49°54'	1°04'	4mn 16s	10h 21mn 00s	
			<i>109mn 52s</i>	<i>51mn 24s</i>	<i>47</i>
Shabla	43°31'	28°32'	1h 54mn 08s	11h 12mn 24s	
<i>Bord Mer Noire</i>			<i>153mn 52s</i>	<i>72mn 36s</i>	<i>47</i>
Karachi	25°	67°	4h 28mn	12h 25mn	

• le quotient de ces 2 différences multiplié par 100 (100 b/a). Il représente le pourcentage de la surévaluation des différences de longitudes déterminées par la méthode supposée utilisée au temps de Ptolémée. Il est d'autant plus fort que la vitesse de propagation de l'éclipse est plus faible.

En un lieu, l'heure locale du milieu de l'éclipse s'obtiendrait en ajoutant la longitude exprimée en heure à l'heure TU du milieu de l'éclipse, et corrigée de l'équation du temps.

Entre les villes de Dieppe et Shabla au bord de la Mer Noire, c'est-à-dire pendant toute la traversée du continent européen, et ensuite entre ce dernier lieu et Karachi au Pakistan, il est remarquable que le pourcentage de la surévaluation des différences de longitudes soit dans les deux cas de 47 % comme le montre le tableau ci-dessus, extrait du précédent :

Des observateurs munis d'un simple gnomon ou disposant d'un cadran solaire, auraient noté l'heure locale de l'éclipse (= heure TU + longitude - 5 mn pour l'équation du temps un 11 août) : 10 heures 20 mn à Dieppe, 13 heures 02 mn au bord de la Mer Noire et 16 heures 48 mn à Karachi. On en aurait déduit que les différences de longitude étaient, entre les deux premiers observateurs, de 2 heures 42 mn (162 mn pour 110 mn réel) et entre les deux derniers, de 3 heures 46 mn (226 mn pour 154 mn réel) soit pour les deux intervalles, des surévaluations des différences de longitudes de 47 %.

En plaçant en toutes les villes citées, des observateurs qui auraient noté l'heure locale de l'éclipse, on en aurait déduit par leurs différences, les différences de longitude à la manière de Ptolémée. En divisant ces différences

par le coefficient 1,47, nous obtenons des différences *corrigées* qui permettent d'obtenir en partant de la longitude de Dieppe par exemple, des longitudes *corrigées* pour les autres stations.

Il est remarquable que ces valeurs ne s'écartent que de moins d'un demi-degré des longitudes connues aujourd'hui, comme le montre le tableau suivant :

en colonne a : longitudes d'aujourd'hui (3^e colonne du 1^{er} tableau)

en colonne b : écart heure locale de l'éclipse avec Dieppe (somme cumulée depuis Dieppe des valeurs a+b du 1^{er} tableau)

en colonne c : différence de longitude *corrigée*, depuis Dieppe

en colonne d : longitude *corrigée*

en colonne e : écart des longitudes *corrigées* par rapport aux longitudes d'aujourd'hui.

Lieux	longitude d'aujourd'hui	écart heure loc éclipse	différence longitude <i>corrigée</i>	longitude <i>corrigée</i>	écart longitude
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c=b/1,47</i>	<i>d=c+1°04'</i>	<i>e=d-a</i>
Plymouth	- 4°09'	- 28 mn 10 s	- 4°47'	- 3°43'	0°26'
Cherbourg	- 1°35'	- 14 mn 30 s	- 2°28'	- 1°24'	0°11'
Dieppe	1°04'	0	0	1°04'	0°
Reims	4°02'	16 mn 22 s	2°47'	3°51'	- 0°11'
Strasbourg	7°45'	37 mn 14 s	6°20'	7°24'	- 0°21'
Munich	11°35'	59 mn 16 s	10°05'	11°09'	- 0°26'
Salzbourg	13°03'	67 mn 44 s	11°31'	12°35'	- 0°28'
Szombathely	16°38'	88 mn 52 s	15°07'	16°11'	- 0°27'
Bucarest	26°05'	145 mn 58 s	24°49'	25°53'	- 0°12'
Shabla	28°32'	161 mn 16 s	27°26'	28°30'	- 0°02'
Turhall	36°	207 mn 44 s	35°20'	36°24'	0°24'
Karachi	67°	387 mn 44 s	65°56'	67°	0°

Cela montre la précision de la méthode de détermination des longitudes par les éclipses de Soleil. Toutefois, ici les heures locales tirées des éphémérides sont précises et ne contribuent pas à entacher les résultats. Pour simuler complètement la méthode de détermination des longitudes au temps de Ptolémée, il faudrait tenir compte de la principale cause d'imprécision qui reste la détermination de l'heure locale : un écart de 4 minutes provoque une erreur de 1° en longitude dans les tables de la Géographie de Ptolémée, soit 0°41' en longitude *corrigée*. On constate, par cette étude de l'éclipse de Soleil du 11 août 1999, une dispersion des écarts entre les longitudes *corrigées* et les longitudes connues aujourd'hui, aussi faible que celle constatée dans la Géographie.

On peut ainsi affirmer que les longitudes des toponymes répertoriées dans la Géographie de Claude Ptolémée, présentent bien toutes les caractéristiques des déterminations obtenues par l'observation des éclipses de soleil, ce qui constitue une vérification probante de l'hypothèse développée par Pierre Herrmann. ●

Contact

Robert VINCENT

Ingénieur École Centrale Paris
Président honoraire de l'AFT
aftopo@club-internet.fr

Gilles Perez : une galerie à ciel ouvert

■ Jean-Pierre MAILLARD

Au nord de l'Auvergne, en limite du Bourbonnais et du Limousin, s'étend un pays ombragé et vallonné, couvert de landes et de bocages, de forêts et d'étangs. C'est la Combraille historique intégrée aujourd'hui aux Combrailles, un plateau accidenté reposant sur un socle cristallin d'origine volcanique entaillé et fécondé par une rivière de montagne : la Sioule. L'unité de la Combraille remonterait à l'époque antique précisément à la tribu gauloise des Cambovices prime occupante, qui lui a donné son nom.

C'est dans ce paysage reposant du Puy-de-Dôme, le Puy de Sancy à l'horizon, que le sculpteur Gilles Perez a décidé de s'installer dans le hameau du Chateix, sur la commune de Chapdes-Beaufort. La maison de l'artiste et son chantier de taille de pierre sont situés au pied du Puy-de-Beaufort qui s'élève à près de 900 m. En 1990 les services municipaux ont amélioré la voie d'accès au site naturel qui porte des vestiges d'un passé architectural gaulois puis moyenâgeux et où se dresse la statue de la Vierge de Beaufort.

Pour sa part, l'association Chamina a créé un chemin balisé de petite randonnée valorisé par les traces des constructions abandonnées qui stimulent l'imagination et la mémoire. Sur trois kilomètres, ce chemin se confond avec la voie communale remaniée et empierrée qui s'embrancher au droit de la propriété de Gilles Perez. Cela n'a pas manqué de susciter alors sa réflexion : *"Puisqu'on fait tomber quelques murs, pourquoi ne pas essayer de restituer autrement la pierre dans le paysage ?"*. Partant, il met en œuvre, dans une démarche collective, son idée d'agréments le parcours par des sculptures de sa main, de prolonger, en harmonie avec l'environnement et l'histoire culturelle du lieu celui-ci ayant été successivement site préhistorique, oppidum gaulois, motte médiévale pour être finalement voué au culte de la Vierge Marie.

Le chemin "Fais'art"

Dès l'origine, le projet a aussi eu une dimension sociale portée par une association éponyme regroupant des personnes intéressées par la sculpture et les métiers de la pierre. L'action de l'association s'inscrit dans le cadre d'un programme départemental d'insertion (PDI) financé par le Conseil général du Puy-de-Dôme. Elle propose à des stagiaires en recherche d'emploi, encadrés par Gilles Perez, de découvrir ou de parfaire une formation professionnelle relative au travail de la pierre jusqu'à employer à mi-temps six à huit personnes qui contribuent à la réalisation des projets et à l'entretien des espaces.

A ce jour, c'est plus de vingt sculptures monumentales qui sont disposées de part et d'autre du cheminement tantôt au bord, tantôt en retrait, ce qui incite le visiteur à s'aventurer dans les sous-bois pour les découvrir. La première œuvre a été implantée en 1992, et depuis, une ou deux sculptures sont créées chaque année.

La référence aux village et tumulus gaulois localisés au Puy-de-Beaufort est significative. L'inspiration mégalithique voire celtique se manifeste d'abord sur les bornes et les balises qui jalonnent le parcours, chaque pierre grossièrement formée portant en relief un signe géométrique ou quasi géométrique sans doute conforme à la culture des premiers occupants. La perception des

œuvres confirme la première impression puisqu'elles sont généralement constituées d'assemblages de pierres, sommairement taillées, qui prennent la forme d'un rideau, d'un escalier, d'une cage ou d'une cloche ajourés, d'une porte cintrée, d'un groupe de mégalithes filiformes, d'un ensemble de sièges organisé en cercle, etc. L'expression de Gilles Perez est à la limite de l'architecture et de l'art car il faudrait ajouter bien peu de choses à plusieurs de ses créations pour les rendre fonctionnelles.

Dans un premier temps l'artiste choisit un lieu qui induit la forme et l'encombrement du projet, que l'endroit appartienne à la commune ou à des propriétaires privés. Il sait d'ailleurs gré à l'une et aux autres de bien vouloir chaque fois accepter la mise à disposition gracieuse du terrain qui reçoit l'implantation de la nouvelle pièce de la collection.

Deux productions s'inscrivent dans une démarche géométrique et méritent attention.

La spirale

Le long du chemin communal, un ressort pétrifié à section rectangulaire posé dans un pré saute à l'œil du marcheur dans toutes ses dimensions et finesse, à moins qu'il s'agisse d'un serpent éprouvant le besoin de s'enrouler pour échapper au contact de la terre ou encore, plus abstraitement, une courbe en 3D figée dans la pierre. Cette ligne courbe est parfaitement régulière et nul doute qu'une formule mathématique la génère. Avec peu de moyens le créateur a réussi la performance de faire tenir en équilibre sa réalisation, résolument contemporaine, dont l'envergure occupe six mètres sur vingt-cinq. Comme



© Yvette Velay



d'autres artistes Gilles Perez s'interroge sur l'harmonie changeante du serpent au fur et à mesure du déplacement du point de vue. On pense notamment à Bernar Venet qui tord le métal en spirale à la recherche d'une harmonie esthétique.

Créée en 1994 cette pièce a nécessité une année de travail.

L'anneau de pierre

Au détour d'un sentier, le regard est attiré par un gigantesque anneau posé sur l'adret et qui tangente le cheminement. La rigueur de la géométrie démontre qu'une intelligence a conduit à sa confection et on doute un instant qu'elle soit extraterrestre. Pour s'en tenir aux contes et à notre planète, on se demande à quelle géante appartient la parure épurée – sans savoir s'il s'agit d'un bracelet ou d'une couronne – et si elle est sur le point de la récupérer ? En revanche, l'écran des arbres rassure sur la stabilité non sans que son inclinaison n'accroisse sa dimension.

Réalisé en 2003, l'anneau de pierre a huit mètres de diamètre et un mètre de haut. Il est construit en blocs de pierre de Volvic légèrement arrondis de 1,20 m de long, comme autant de bordures de trottoir. Les blocs agencés en quinconce sont sertis par une structure d'acier très

fine, conférant une grande légèreté à une pièce de huit tonnes. La prouesse technique de sa pose sur un terrain pentu souligne cette impression.

Gilles Perez

Gilles Perez est né à Clermont-Ferrand en 1954. Cet ancien étudiant en électrotechnique a le goût de l'espace et de l'indépendance qui le pousse à vivre dans un lieu resté authentique. Il a débuté sa formation artistique, autodi-

dacte, avec le granit. Maintenant il travaille aussi bien la lave volcanique, la pierre de Volvic que le bronze. Installé sculpteur et tailleur de pierre depuis 1979, il s'exprime principalement par la sculpture monumentale. Il est aussi un spécialiste de la restauration d'éléments d'architecture en pierre de Volvic et de fontaines.

Enfin et on l'aura déjà compris, Gilles Perez est, à mi-temps, salarié de l'association comme chef de chantier et chargé de formation.

Si on le questionne sur la signification de ses créations, il hésite, observe et répond : "je voudrais que chacun s'installe au pied d'une sculpture et laisse libre cours à son imagination !"

Sans plus d'explication, on retiendra que la démarche de Gilles Perez est autant sociale qu'artistique. Il faut donc saluer la constance de l'homme qui depuis quinze ans pratique la sculpture, la formation et croit à l'insertion. Ce faisant il a permis et permet encore aujourd'hui aux stagiaires de se reconnaître tout comme lui dans le chemin "Fais'art", mais aussi surtout dans les pierres qui marchent, l'intitulé du site Internet qui résume bien, dans une belle métaphore, la dimension humaine de l'entreprise. ●

Pour tous renseignements :
www.lespierresquimarchent.fr



© Yvette Velay

Plus important que le relais de la flamme olympique ?

■ François BODIN

A l'heure où les missions d'été des jeunes élèves des écoles d'ingénieur se préparent, les membres du bureau de Géomètres Sans Frontières sont heureux de vous communiquer en quelques lignes la façon dont Elysé, stagiaire malgache reçu pendant quatre mois en stage en France en 2007, a pris à cœur de poursuivre l'investissement des membres de l'association dans la formation des jeunes.

diplômés de sa région qui aide et réalise des travaux humanitaires, en général sous couvert des autorités locales.

Merci aux donateurs de matériel, Leica en l'occurrence, et merci Elysé d'avoir bien repris le flambeau de l'esprit qui anime la petite équipe de GSF. ●

Rentré en juillet 2007 dans son pays, Elysé a obtenu son diplôme d'Ingénieur après sa soutenance en septembre, puis a rejoint le bureau de géomètre de son père, à 70 kilomètres à l'est d'Antananarivo où il travaille tout en effectuant son stage de Géomètre Libre Assermenté qui devrait lui permettre de reprendre en main les destinées du cabinet familial.

manière à l'avenir de leur pays ; nous sommes particulièrement satisfaits, à GSF, que cette participation ait pu croiser la route de la formation d'un Ingénieur Hydraulicien. La modestie d'Elysé dut-elle en souffrir, nous mentionnerons également sa participation active à une association de jeunes

PS : Depuis l'assemblée générale du 24 janvier 2008 le bureau de Géomètres Sans Frontières est composé de :

Claire GALPIN Présidente

Alain RIOU Secrétaire-Trésorier

François MARZANASCO Vice-Président

"Depuis ces six mois qui ont suivi mon diplôme j'ai reçu trois étudiants de la filière Information Géographique et Foncière de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo pour des stages de pratique topographique qui font encore défaut sur le campus.

Depuis la manipulation de l'appareil jusqu'au traitement numérique des données et leur mise en forme au travers d'application topographique ou de bornage, ils sont prêts à l'issue de ces périodes pour rejoindre les entreprises susceptibles de les embaucher.

J'ai aussi accueilli pour une partie de son travail de fin d'études un étudiant hydraulicien : il s'agissait d'une étude d'aménagement de chute d'eau en vue de fournir en électricité les bâtiments de la région touristique isolée d'Andrigitra. Les photos jointes vous permettent d'apprécier l'importance des dénivelées et la nécessité de fournir une topographie sérieuse."

Elysé RANDRIAMALAZARIVO

Le développement touristique devenant une des composantes du développement futur de Madagascar, les topographes se devaient de participer à leur



■ Raymond D'HOLLANDER

On désigne par ε l'excès sphérique d'un triangle sphérique : $\varepsilon = A + B + C - \pi$,
 A, B, C sont les angles, a, b, c les côtés. On rappelle les formules de Delambre :

$$\cos \frac{A+B}{2} \cos \frac{c}{2} = \cos \frac{a+b}{2} \sin \frac{C}{2} \quad \text{et} \quad \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{c}{2} = \cos \frac{a-b}{2} \cos \frac{C}{2}$$

Démontrer la formule d'Euler :
$$\cos \frac{\varepsilon}{2} = \frac{1 + \cos a + \cos b + \cos c}{4 \cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2}}$$

La solution de cette récréation sera donnée dans le prochain n°116 de XYZ.

Solution de la récréation mathématique du n° 114 d'XYZ

1 - Lorsque le triangle sphérique est équilatéral, la formule fondamentale de la trigonométrie sphérique devient :

$$\cos a = \cos^2 a + \sin^2 a \cos A, \text{ d'où : } \cos A = \frac{\cos a (1 - \cos a)}{1 - \cos^2 a} = \frac{\cos a}{1 + \cos a} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\cos A} = \frac{1 + \cos a}{\cos a} = \frac{1}{\cos a} + 1 \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{\cos a} = \frac{1}{\cos A} - 1 = \frac{1 - \cos A}{\cos A} \quad \text{d'où l'on déduit : } \cos a = \frac{\cos A}{1 - \cos A} \quad \text{c.q.f.d.}$$

2 - L'aire $\delta = A + B + C - \pi$ devient pour un triangle équilatéral : $\delta = 3A - \pi$ et pour la sphère entière on a : $\Sigma = 4\pi$.

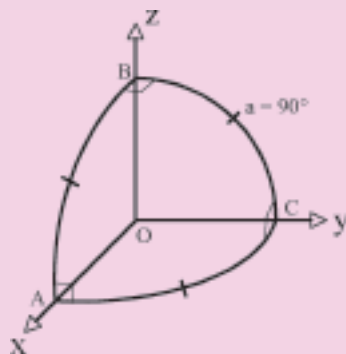
Nous nous imposons : $\frac{\delta}{\Sigma} = \frac{1}{n}$, c'est-à-dire : $3A - \pi = \frac{4\pi}{n}$, d'où : $3A = \pi + \frac{4\pi}{n}$ et $A = \frac{\pi(4+n)}{3n}$.

Comme $\cos a = \frac{\cos A}{1 - \cos A}$ on a bien : $\cos a = \frac{\cos \frac{\pi(4+n)}{3n}}{1 - \cos \frac{\pi(4+n)}{3n}}$ c.q.f.d.

3 - Pour $n = 3$, $\cos a = \frac{\cos \frac{7\pi}{9}}{1 - \cos \frac{7\pi}{9}} = \frac{\cos 140^\circ}{1 - \cos 140^\circ} = -0,43376$ $a = 115,706^\circ$

Pour $n = 4$, $\cos a = \frac{\cos \frac{2\pi}{3}}{1 - \cos \frac{2\pi}{3}} = \frac{-0,5}{1,5} = -\frac{1}{3}$ $a = 109,471^\circ$ – Pour $n = 5$, $\cos a = \frac{\cos \frac{3\pi}{5}}{1 - \cos \frac{3\pi}{5}} = \frac{\cos 108^\circ}{1 - \cos 108^\circ} = -0,236058$ $a = 103,654^\circ$

Pour $n = 6$, $\cos a = \frac{\cos \frac{10\pi}{18}}{1 - \cos \frac{10\pi}{18}} = \frac{\cos 100^\circ}{1 - \cos 100^\circ} = -0,1479556$ $a = 98,508^\circ$ – Pour $n = 8$, $\cos a = \frac{\cos \frac{12\pi}{24}}{1 - \cos \frac{12\pi}{24}} = \frac{\cos \frac{\pi}{2}}{1 - \cos \frac{\pi}{2}} = 0$ $a = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$



En effet le triangle sphérique dont l'aire est la huitième partie de l'aire de la sphère entière est la partie comprise entre 3 axes triangulaires Ox, Oy, Oz .

Ce triangle sphérique à la fois équilatéral et trirectangle (voir figure) a bien une aire égale au huitième de l'aire de la sphère entière.

D'après la relation (1) si $a = \frac{\pi}{2}$, on a : $\cos A = \frac{\cos a}{1 + \cos a} = \frac{\cos \frac{\pi}{2}}{1 + \cos \frac{\pi}{2}} = 0$ $A = B = C = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$



■ Guide du commissaire-enquêteur, ou du bon usage de l'enquête publique

Edition 2003 - Mise à jour mars 2007.

Préfacé par le vice-président du Conseil d'État au nom de la juridiction administrative et des présidents des tribunaux administratifs.

L'enquête publique est un moment fort de la procédure de décision qui concerne un projet intéressant le public au premier degré. Elle consiste à soumettre à l'avis de la population, préalablement à la décision, le dossier d'un projet d'aménagement, d'équipement, d'ouvrage, de travaux ou de document d'urbanisme (voirie routière et autoroutière, voies ferrées, aérodromes, installations classées, carrières, lignes électriques, projets sur l'eau, SCOT, PLU, ZAC, etc.).

Le commissaire-enquêteur est chargé de conduire l'enquête ainsi diligentée à l'initiative de l'autorité organisatrice (préfet ou maire le plus souvent). Son rôle consiste à s'assurer de la bonne information du public, à recueillir ses observations sur le projet et à donner son avis. Étant donné l'indépendance par rapport à l'administration, au maître d'ouvrage et au public que lui confèrent les textes en vigueur, et l'importance de son avis dans la suite de la procédure de décision, son rôle est devenu essentiel.

"Après une introduction générale sur les différentes enquêtes publiques, ce guide s'attache, de façon extrêmement claire et didactique, à décrire la mission du commissaire-enquêteur, les moyens qui lui sont donnés pour la remplir et les devoirs qui lui incombent jusqu'à la remise de son rapport. Ce guide devrait à la fois les éclairer et leur permettre d'exercer au mieux leurs missions délicates. L'exposé méthodique du déroulement de l'enquête publique et du rôle du commissaire-enquêteur tout au long de celle-ci, jusqu'à la remise de ses conclusions, est illustré

par de nombreux exemples concrets, et par le rappel de la jurisprudence."

Premier rédacteur, René Bourny, président d'honneur fondateur de la CNCE a fait don de son ouvrage à la Compagnie nationale, à charge pour elle de l'éditer et de le tenir à jour.

La première édition est parue en 1996. Depuis l'année 2000, **Roger Le Buhan** a repris la charge de la rédaction de cette publication, en prenant en compte l'évolution du droit des enquêtes publiques et de la fonction de commissaire-enquêteur. Roger Le Buhan est membre d'honneur de la CNCE et coordonnateur de secteurs techniques.

- Publications de la Compagnie nationale des commissaires-enquêteurs (CNCE)
Bon de commande sur www.cnce.fr

Jusqu'au lundi 20 octobre 2008, exposition au musée national de la Marine (Palais de Chaillot) "Le mystère Lapérouse, enquête dans le Pacifique sud" entrée 9 €

■ Dictionnaire topographique du département de Saône-et-Loire

Comprenant les noms de lieux anciens et modernes

Jean Rigault

Chaque département est l'objet d'un dictionnaire particulier comprenant : une introduction, dans laquelle l'auteur fait sommairement la description physique du département et passe en revue les anciennes circonscriptions auxquelles il répond ; puis une liste des documents employés pour rechercher les anciens noms ; ensuite, une nomenclature très détaillée des noms de géographie physique (montagnes, rivières, forêts, etc.), des noms de lieux habités et des noms se rapportant à la géographie historique ; enfin, une liste des noms anciens, avec renvoi aux formes modernes correspondantes.

On y voit, pour ainsi dire, l'acte de naissance de chacune des communes, des hameaux ou domaines.

- Les Editions du CTHS
Prix : 100 € - 936 pages
ISBN : 978-2-7355-0630-9



■ Bac Pro Technicien géomètre topographe

Serge Bouquillard

TOME 1 - TOME 2

Cet ouvrage en deux tomes est conforme au référentiel du Bac Professionnel Technicien géomètre-topographe créé en mars 2007. Le premier tome aborde l'ensemble des notions de topographie nécessaires à la formation des futurs techniciens. Le second tome est consacré aux traitements graphiques, au foncier et au droit professionnel, ainsi qu'aux domaines particuliers d'intervention du géomètre (aménagement, bâtiments et travaux publics). Les ouvrages comportent des exemples traités, des sujets et leurs corrigés.

- Casteilla - TOPBAC1
Prix : 30,90 € - 265 pages
EAN : 978-2.7135.2937.5
- Casteilla - TOPBAC2
Prix : 26,80 € - 200 pages
EAN : 978-2.7135.2939.9

■ Les cahiers historiques de l'IGN n°6 - L'ENSG 1941 - 2004

Raymond D'Hollander
Raymond Testard - Jean Denègre
Roger Serre

L'association des personnels retraités de l'IGN, avec l'appui de la direction générale de l'établissement public, poursuit la rédaction des cahiers historiques de l'institut.

Le présent cahier, le n°6, fait revivre l'histoire de "l'Ecole nationale des sciences géographiques", bien connue par son sigle "ENSG", de ses origines (1941) à l'année 2004.



- En vente à l'APRIGN
Prix : 5 €
2, avenue Pasteur
94165 St-Mandé Cedex



■ "Quels espaces pour demain ?"

Erik Orsenna - Patrick Bernasconi

"Quels espaces pour demain ?" est un ouvrage conçu sous l'égide de la Fédération nationale des travaux publics (FNTP) et sous la direction d'Erik Orsenna de l'Académie Française et de Patrick Bernasconi, président de la FNTP.

En cinq chapitres – Espace et décision politique, Espace et cohésion sociale, Espace et mobilité, Espace et ruralité, Espace et Europe –, des experts de toutes les disciplines, histoire, philosophie, architecture, urbanisme, sociologie, politique, économie, examinent les problématiques des grands travaux d'équipement et les mesurent à l'aune de leur spécialité.

C'est cette interdisciplinarité qui fait la richesse de l'ouvrage, c'est elle qui fait émerger des questions difficiles : comment faire pour concilier le temps court du politique et le temps long des grands travaux ? Comment faire pour intégrer de façon efficace les grandes questions de l'environnement ? Comment faire pour recréer du lien social dans des villes de plus en plus éclatées ? S'ils n'apportent pas de réponse à ces questions, les signataires n'en proposent pas moins des pistes fortes de réflexion.

► Editions Stock

Essai (broché) - Prix : 19 €
ISBN : 2234061652



■ Sous surveillance ! Démêler le mythe de la réalité

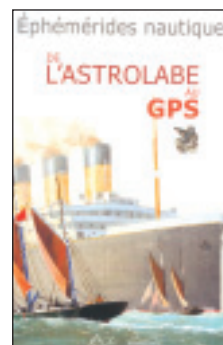
Françoise de Blomac et Thierry Rousselin

Caméras de surveillance au coin de la rue, localisation de votre téléphone par votre patron, images satellites qui montrent jusqu'au détail de votre serviette de bain, puce électronique sous la peau pour entrer au carré VIP d'une boîte à la mode...

Sommes-nous tous aujourd'hui réellement sous surveillance ? Toutes ces merveilleuses techniques, qui protègent nos enfants et nous facilitent la vie, ne sont-elles pas en train de construire un Etat de surveillance totale ? Si c'est le cas, pourquoi la délinquance ne faiblit-elle pas et pourquoi Ben Laden reste-t-il introuvable ? Et qui tire les ficelles ? Même si l'assemblage cohérent de toutes ces techniques relève encore aujourd'hui plus du fantasme des séries télé que de la réalité, nous sommes en train de franchir un pas (irréversible ?) en abandonnant certaines de nos libertés fondamentales au profit d'une sécurité (peut-être) accrue. L'heure est à la vigilance, si nous voulons que Big Brother reste au rayon "anticipation". Mais pour cela, encore faut-il démêler le possible de l'impossible, la réalité du mythe ...

► Les Carnets de l'Info

Prix : 16 € - ISBN : 978-2-9166-2829-5



■ Éphémérides nautiques de l'astrolabe au GPS

ou la navigation astro : des premières découvertes aux techniques contemporaines

Cet ouvrage est le fruit d'une journée de réflexion organisée par l'IMCCE, le Bureau des longitudes, l'Observatoire de Paris et les éditions Édinautic, autour de la publication des Éphémérides nautiques.

D'éminents spécialistes et historiens se sont réunis à l'Observatoire de Paris afin de débattre, face à un public attentif et passionné, sur les plus récentes techniques de navigation, leurs fondements historiques et scientifiques ainsi que leur évolution future.

Isabelle Autissier a apporté son témoignage de navigatrice sur l'événement capital de ces dernières années : le passage du sextant au GPS.

Un ouvrage à la portée de tous, qui doit avoir une place dans la bibliothèque de ceux qui s'intéressent au thème passionnant de l'histoire de la navigation "astro" et accordent l'attention qu'ils méritent aux astres, aux galaxies, en un mot, à l'univers.

► IMCE - Edinautic

Prix : 10 € - 100 pages
ISBN : 2-910015-57-2

Le numéro ISBN indiqué pour chaque ouvrage vous permet de le commander en librairie.

REPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 115

CADDEN	28	GÉOMEDIA	4 ^e de couv	TOPCON	6
CORRELANE	27	LEICA	2	TRIMBLE	2 ^e de couv et 13
ECOLE CHEZ SOI	4	REIS STOLZEL	44		
ESRI	3 ^e de couv	STAR APIC	1		