

xyz

aft
association française
de topographie



n° 156

À l'Etna avec les étudiants de l'École normale supérieure, la multidisciplinarité en action

Page 21



Les représentations
planes de la Terre
page 36



SIG 2018



Conférence Francophone Esri
10 & 11 octobre - Les Docks de Paris

Venez participer au premier événement consacré à la dimension géographique

Découvrez le programme complet sur :
<https://sig2018.esrifrance.fr>

Un événement organisé par



esri France

avec le soutien de



Conférence organisée en partenariat avec :



GEOMAP-IMAGIS
Geo-Solutions Professionnelles



AUTODESK - when it has to be right

Leica
Geosystems

SOMMAIRE

Directeur des publications

Tania Landes
Maître de conférences
INSA de Strasbourg

Directeur des publications adjoint

Bernard Flacelière
Ingénieur topographe

Rédaction et administration XYZ

73 avenue de Paris
94165 Saint-Mandé Cedex
Tél. +33 (0) 1 43 98 84 80

Rédacteur en chef

Bernard Flacelière

Comité de Rédaction

André Bailly
Ingénieur géomètre ETP
Françoise Duquenne
Ingénieur général des Ponts honoraire
Stéphane Durand
Maître de conférences à l'ESGT

Ghyslain Ferré

Enseignant en topographie

Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg

Michel Kasser

Professeur des universités

Jean-Pierre Maillard
Géomètre-expert foncier

Emmanuel Natchitz

Ingénieur géomètre

Elodie Sissler

Enseignant en topographie et foncier

Flavien Viguier

Ingénieur topographe

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

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

Conception et maquette

Dorothée Picard

ALBEDIA IMPRIMEURS

Zone industrielle de Lescudilliers
26 rue Gutenberg
BP 90449 - 15004 Aurillac Cedex
Tél. 04 71 63 44 60
Fax 04 71 64 09 09



Dépôt légal

3^e trimestre 2018 ISSN 0290-9057

Tirage de ce numéro : 1 600 ex

Abonnement annuel

France : 90 €

Étranger (dont CEE) : 93 €

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 : 25 €

Membre du Syndicat de la presse culturelle et scientifique (SPCS)

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 : Maintenance des dosimètres à radon par le docteur Luca Terray sur les bords du cratère Bocca Nuova à l'Etna. © BF

afto La revue XYZ est éditée par l'association française de topographie

Membre de la FIG (Fédération internationale des géomètres) **FIG**
73 avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé Cedex - Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

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

Editorial 3

InfoTopo

> Les informations de la profession 4

Hommage

> Yves Robin-Jouan ami, marin et géomètre 8

Association

> Rapport moral de l'année 2017 présenté à l'assemblée générale de l'AFT le 21 juin 2018 à l'IGN - Saint-Mandé
Mathieu KOEHL 9

Manifestation

> L'Ordre des géomètres-experts à Bordeaux pour son 44^e congrès, Géomètre-expert garant d'un cadre de vie durable !
Bernard FLACELIÈRE 13

> Le congrès de la FIG à Istanbul, carrefour de civilisations
Bernard FLACELIÈRE - Anne GIRARDIN
Jean-Pierre MAILLARD 14

> La cartographie mobile et le géoréférencement précis de réseaux souterrains
Garance WELLER - Quentin DARTIAILH 17

La vie des écoles

> À l'Etna avec les étudiants de l'École normale supérieure, la multidisciplinarité en action
Bernard FLACELIÈRE - Louise LE VAGUERESSE
Arnaud OLLIVIER - Luca TERRAY 21

Métrologie

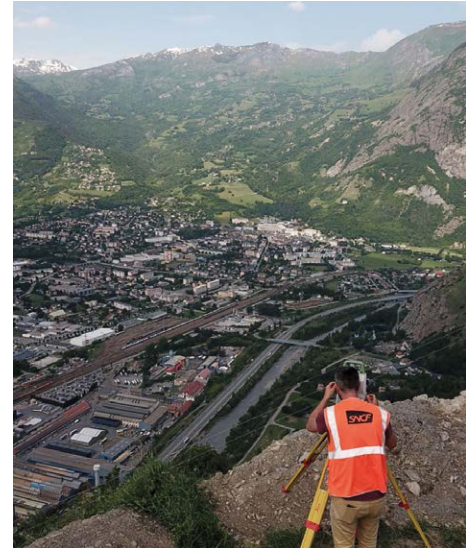
> À quelles altitudes se trouvent les horloges atomiques de l'observatoire de Paris ?
Xavier COLLILIEUX - Pacôme DELVA - Laurent HEYDEL - Guillaume LION - Fabien BERGERAULT
Raphaëlle DELAUGERRE - Loïc EVRARD - Sylvain GONNET - Damien PESCE - Patrice PREZAT 26

Hydrographie

> La journée mondiale de l'hydrographie 2018 : l'hydrographie au service du développement durable
Gilles BESSERO 31

Géodésie

> Les représentations planes de la Terre
Françoise DUQUENNE 36



> La campagne géodésique de SNCF Réseau pour la régénération de son infrastructure : de la préparation à la diffusion
Florian BIROT - Alex BONGIBAULT - Pierre LASSEUR - Mathieu REGUL 43

Navigation

> Développement d'une procédure d'amélioration du calcul de trajectographie d'un système de cartographie dynamique
Katia MIRANDE 51

Lasergrammétrie

> Méthode de comparaison de nuages de points acquis par scanner laser mobile pour caractériser les éboulements des falaises côtières
Baptiste FELDMANN - Clara LEVY
Thomas DEWEZ - Nathalie MARÇOT 57

Histoire

> Le souterrain du krak de Montréal - Jordanie
Paul COURBON 63

Art et géométrie

> Nicolas Sahnès, les Simonnet, Christian Zimmermann : le rouge dans le vert
Jean-Pierre MAILLARD 68

Ouvrages

André BAILLY 70

GSF

> L'Afrique à l'honneur
Claire GALPIN 72

PROCHAIN XYZ - n° 157
Représentations planes cylindriques de la Terre

Pour la recherche de nos annonceurs consulter la page 71

Sam, BIM Manager, utilise la nouvelle solution Leica RTC360...

... une solution ultra compacte de capture de la réalité 3D. Elle vous permet d'améliorer la gestion et la documentation de vos projets tout en vous garantissant la meilleure efficacité et la plus grande productivité.



RAPIDE, AGILE, PRECIS.

Rendez-vous sur <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>



Place aux jeunes ?

Quel meilleur endroit que l'éditorial pour annoncer les résultats des élections tenues en juin dernier. Pour faciliter la participation, le vote électronique, via la plate-forme Bélénios, a été préféré.

Les adhérents sans adresse courriel ou tout simplement réfractaires à l'informatique ont pu voter par courrier postal, on espère pour la dernière fois. La rédaction donne rendez-vous dans deux ans pour le prochain scrutin à ceux qui ont omis de participer à celui-ci. Venons-en aux résultats :

- les membres sortants du conseil, Serge Botton, Ghyslain Ferré, Michel Trouillet, Emmanuel Natchitz et Rani El Meouche ont été réélus pour 6 ans,
- les nouveaux arrivants Laurent Heydel, 51 ans (élu pour 6 ans), Emmanuel Clédat, 26 ans et Flavien Viguié, 34 ans (élus pour 2 ans chacun) rejoignent le conseil,
- Frédéric Auger et Yves Recloux n'ont pas eu la faveur des électeurs et sont invités à persévérer dans l'intérêt qu'ils portent à l'Association.

Nous félicitons les élus et nous notons que l'âge moyen des membres du conseil vient de baisser de manière significative ; nous y voyons donc un signal d'optimisme et prévoyons une revitalisation de l'AFT. Certains diraient place aux jeunes !

Dans ce numéro, il est également fait référence à la jeunesse à plusieurs occasions.

- Au congrès de l'Ordre des géomètres-experts de Bordeaux, notre collègue Rani El Meouche nous a parlé de ses élèves et de cette *"génération connectée, branchée d'une part mais aussi démotivée, impatiente d'autre part"* (page 13).
- Lors de l'expédition de l'École normale supérieure à l'Etna, l'auteur a pu côtoyer une génération de tout juste vingt ans et en apprécier sa qualité, sa culture, son intérêt pour des domaines aussi variés que la volcanologie, la géodésie, la linguistique ou la mythologie (page 21).
- Lors du congrès de la Fédération internationale des géomètres à Istanbul l'accent a été mis sur le *FIG Young Surveyor Network* (réseau des jeunes géomètres-topographes). Les représentants de l'AFT montrent qu'il y a de la place à prendre pour les francophones dans ce réseau (page 16).
- Les 7^e Universités de la Fédération des géomètres francophones sont annoncées fin novembre à Rabat. Et voici que Marc Vanderschueren, président de la FGF et Khalid Yousfi, président de l'Ordre national des ingénieurs géomètres topographes du Maroc mettent à l'ordre du jour la *"constitution du réseau des jeunes géomètres francophones"* (agenda page 6).
- Enfin à la page GSF et sous le titre *"L'Afrique à l'honneur"*, Claire Galpin nous brosse le portrait de jeunes Burundais, Ivoirien et Camerounais qui font, par leur réussite, honneur à notre profession (page 72).

Certains disent donc place aux jeunes, mais pour ce faire que ces jeunes se manifestent, entrent de plain-pied dans la profession, dans les associations nationales, francophones et internationales ! Qu'ils prennent part à leurs activités, études, commissions, événements et savez-vous quoi, on peut même y voter démocratiquement lors des élections statutaires, voire s'y présenter comme candidat.

Une bonne nouvelle pour terminer : à l'affût des réseaux sociaux et de la presse, je note avec plaisir que la demande de techniciens ou d'ingénieurs géomètres-topographes n'a jamais été aussi grande. Lisant une offre d'emploi pour embaucher 4 professionnels dans le domaine de l'acquisition numérique, un concurrent glose : *"Vous aurez de la chance si vous les trouvez, nous on n'y arrive pas !"*. Il y a donc de la place pour les jeunes.

Bernard Flacelière

■ Drones : nouvelles règles européennes pour un ciel plus sûr

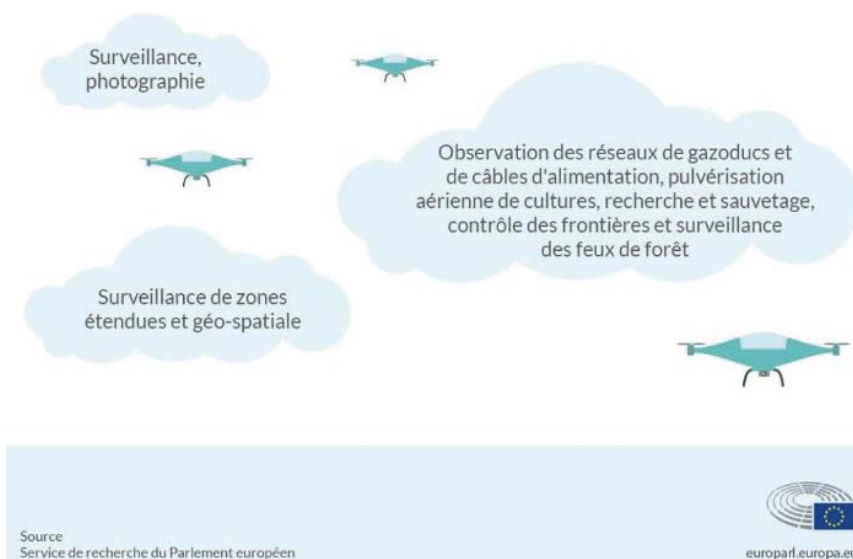
Les premières règles européennes sur les drones protégeront les consommateurs et assureront la sécurité et le respect de la protection des données, de la vie privée et de l'environnement.

Le 12 juin, les députés ont adopté de nouvelles règles de sécurité aérienne, afin de permettre aux drones de toutes tailles de voler sans risque dans l'espace aérien européen, de garantir de la clarté et de la cohérence dans toute l'Europe.

Alors que les drones plus lourds sont soumis aux règles générales de l'aviation, les aéronefs sans pilote pesant moins de 150 kg ne sont réglementés qu'au niveau national. Disposer de standards différents et fragmentés pour chaque État membre complique le commerce transfrontalier et est dangereux. Les drones posent plusieurs problèmes concernant la sécurité : ils peuvent endommager d'autres aéronefs et causer des dégâts ainsi que de la pollution atmosphérique et acoustique. De plus, les drones munis de caméras peuvent être intrusifs et enregistrer des données personnelles sans consentement.

Les nouvelles règles s'appliqueront à toutes les parties des drones (aussi bien à l'appareil qu'à la manette de contrôle) et garantiront que les utilisateurs et les fabricants à travers l'Europe respectent la sécurité, la vie privée, les données personnelles et l'environnement.

Utilisation des drones :



Les utilisateurs devront garder leur drone à une hauteur et à une distance maximale afin d'éviter de mettre en danger les personnes au sol et les autres utilisateurs dans l'espace aérien. L'accès à certaines zones telles que les aéroports, les ambassades, les prisons et les centrales nucléaires sera interdit ou restreint. L'enregistrement sera obligatoire pour les drones pouvant causer des blessures suite à une collision. Les drones enregistrés

seront marqués et donc facilement identifiables. Les drones devront être conçus pour minimiser la pollution atmosphérique et acoustique. Une fois que la nouvelle législation entrera en vigueur, la Commission européenne travaillera sur des règles plus détaillées.

► Infos : <http://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/economy/20180601ST004820/drones-des-regles-europeennes-pour-un-ciel-plus-sur>

■ TERIA : nouveau site et inauguration sur l'île de la Réunion

TERIA (société EXAGONE) a présenté son nouveau site internet (www.reseau-teria.com) comme plus moderne, plus intuitif, plus accessible... Parallèlement à cet événement, l'inauguration des installations touristiques du Cap de Langevin a eu lieu sur l'île de la Réunion le 11 juin 2018.



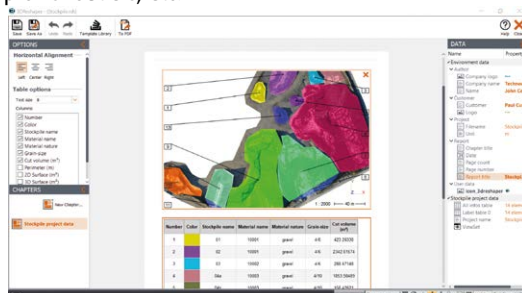
Elle s'est passée dans la commune de Saint-Joseph en présence de Patrick Lebreton, maire de la ville, Jean-François Dalbin, Président de l'OGE, Jean Berterreche, Président de la société EXAGONE, l'IGN, les géomètres-experts locaux, les représentants de services techniques et entreprises de BTP et plusieurs classes de l'école de Langevin.

Le Cap de Langevin a été défini comme étant le site le plus austral des départements français et du territoire de l'Union européenne grâce à une opération de mesure menée par TERIA, la ville de Saint-Joseph et validée par l'IGN. Cette mesure a été réalisée à l'aide des stations permanentes TERIA déployées sur l'île quelques semaines plus tôt et qui sont désormais au nombre de neuf.

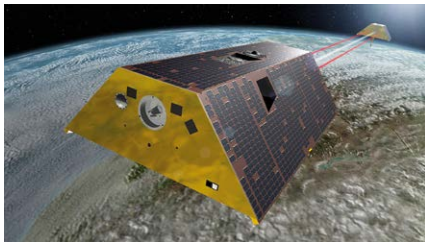
Une borne matérialisant le point le plus au Sud, une table d'information, ainsi qu'un totem décrivant la côte et les distances avec Paris, l'Australie, l'Afrique du Sud et les îles Kerguelen ont été installés.

■ Sortie officielle de 3DReshaper 2018

La version 2018 de 3DReshaper est sortie officiellement avec de nombreuses nouvelles fonctionnalités. Cette version apporte un nouvel éditeur de rapports grâce auquel créer, éditer, personnaliser ses propres rapports, à partir de modèles prédéfinis ou depuis le début, est désormais possible. 3DReshaper 2018 permet également de travailler un nuage de points avec encore plus de précisions qu'avant : l'outil nettoyer / séparer a été amélioré de manière significative pour un usage plus facile et plus rapide. De nouveaux outils de segmentation et filtrage ont également été implémentés. 3DReshaper s'adapte aussi à l'environnement des géomètres : nouvelle commande pour prendre des mesures sur les stocks de matériaux, possibilité de calculer des inspections 2D pour les profils routiers, etc.



■ Lancement des satellites GRACE-FO d'Airbus



Les satellites jumeaux GRACE-FO (*Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On*), conçus et réalisés par Airbus, ont été lancés fin mai 2018 depuis la base aérienne militaire de Vandenberg, en Californie (États-Unis), à bord d'un lanceur Falcon 9. GRACE-FO est une coopération entre la NASA et le Centre allemand de recherche en géosciences (GFZ) de Potsdam. Les mesures précises de la distance qui sépare les satellites jumeaux évoluant sur une orbite polaire basse coplanaire serviront à créer des modèles mondiaux à haute résolution du champ gravitationnel de la Terre, fournissant des informations précises sur le mouvement des masses, et en particulier des masses d'eau, à la surface du globe.

La mission est exploitée depuis le centre d'opérations spatiales de l'Agence spatiale allemande (DLR). Les deux satellites gravitent autour de la Terre sur une orbite polaire à environ 490 km d'altitude, et à 220 km l'un de l'autre. La mission est prévue pour une durée nominale d'au moins cinq ans. Grâce à un instrument à micro-ondes construit par le *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA, qui gère la mission pour le compte de l'agence américaine, les satellites mesurent en permanence et avec une précision de l'ordre de quelques microns la distance qui les sépare. Simultanément, un accéléromètre construit par l'ONERA, en France, détermine l'effet de forces non gravitationnelles, telles que la traînée atmosphérique et les radiations solaires. Les données permettent de générer tous les mois des cartes des fluctuations du champ gravitationnel de la Terre, à travers l'observation des mouvements de l'eau, de la glace et des terres émergées. Enfin, chaque satellite fournit quotidiennement jusqu'à 200 profils de la répartition thermique et de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère et de l'ionosphère afin de faciliter les prévisions météorologiques.

■ L'ESI 1³, l'Incubateur de la Smart Construction



Les ESITC de Metz et Paris lancent le 1^{er} appel à projet de leur incubateur dédié au secteur de la construction. À compter de septembre 2018, l'ESI 1³ hébergera et accompagnera les porteurs de projets souhaitant créer des startups innovantes dans le domaine de la *Smart Construction*. Dans un secteur en pleine mutation et croissance économique, fort des réseaux de partenaires des 2 établissements, le domaine d'intervention de l'ESI 1³ se concentre sur l'accompagnement de projets originaux de création d'entreprises innovantes. Ses objectifs sont de mutualiser les outils d'accompagnement, promouvoir l'entrepreneuriat, apporter une expertise, des moyens techniques, logistiques et financiers pour aider les jeunes startups à concrétiser et développer leurs entreprises. Le projet étudié par un Comité de pilotage, composé de la Direction des écoles, des partenaires ainsi que d'experts, établira la viabilité du projet. Les futurs entrepreneurs entreront alors en phase d'incubation suivant un programme sur 12 mois.

► Informations : www.esitc-paris.fr/fr/incubateur-esi-1-cub

■ Accès gratuit à la plate-forme ArcGIS pour les établissements dédiés à l'enseignement agricole

Esri France soutient l'enseignement agricole en lançant un programme de gratuité en faveur de la démocratisation de l'information géographique. Ainsi, les établissements d'enseignement agricole (soit près de 800 lycées publics, CFA, CFPPA, MFREO, UNREP et CNEAP) ont désormais accès à la plate-forme ArcGIS. Esri met en effet à disposition des personnels enseignants et des élèves les licences et informations pour créer des StoryMaps, un compte ArcGIS Online et ses applications mobiles, le logiciel ArcGIS ainsi que les extensions Spatial Analyst et Geostatistical Analyst, 3D Analyst...

Les outils permettent aux professeurs et à leurs classes d'accéder à des ressources telles que des tutoriels, des fiches d'aide à l'utilisation et des exercices. Les thématiques couvertes par les applications agricoles vont de l'étude des parcours des animaux à l'étude des paysages en passant par l'évolution de la présence des nuisibles. Cette initiative est soutenue par l'organisme Sigea (Systèmes d'information géographique pour l'enseignement agricole), qui s'associe à Esri dans cette démarche.

► Site (page dédiée) : <https://www.esrifrance.fr/donation-education.aspx>

■ Mission de l'IGN à Saint-Pierre-et-Miquelon

Du 22 mai au 6 juillet 2018, une équipe de sept agents de l'IGN a parcouru l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon et vécu une aventure scientifique et humaine hors du commun. Sa mission : constituer un réseau de points de repères pour l'équipement cartographique du

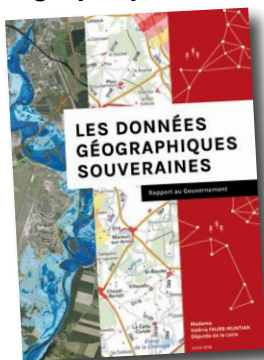


territoire, un préalable indispensable aux travaux d'aménagement. Les agents sont intervenus sur le terrain pendant sept semaines. Leur mission consistait à améliorer l'exactitude et la précision du réseau géodésique de l'archipel par des méthodes et à l'aide d'un matériel de haute technicité. L'objectif était de disposer d'un ensemble de points de repères fiables à un niveau centimétrique sur ce territoire dont l'aménagement est soumis à de fortes contraintes. L'archipel doit en effet faire face à d'importants risques liés aux changements climatiques, tels que l'évolution du niveau de la mer ou l'érosion littorale. L'équipe IGN a travaillé en étroite relation avec la Direction des territoires, de l'alimentation et de la mer (DTAM), l'administration locale en charge d'étudier la vulnérabilité de l'archipel à ces risques.

► Pour en savoir plus : <http://www.ign.fr/institut/actus/mission-saint-pierre-miquelon>



Rapport sur les données géographiques souveraines



Le vendredi 20 juillet 2018, Mounir Mahjoubi, secrétaire d'État auprès du Premier ministre, chargé du Numérique, et Brune Poirson, secrétaire d'État auprès du ministre d'État, ministre de la Transition écologique et solidaire, ont reçu Valeria Faure-Muntian, députée de la Loire, pour la remise de son rapport sur les données géographiques souveraines. Il est le résultat de la mission confiée par le Premier ministre le 5 février 2018 dans le cadre de la démarche Action Publique 2022. L'État a besoin de données géographiques, de référence et certifiées pour exercer ses missions en matière de défense, de sécurité, de fiscalité, de protection de l'environnement, de transports, etc. Il s'agit de "données souveraines". L'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) est aujourd'hui l'acteur public central et reconnu de la production de données géographiques mais d'autres acteurs publics produisent aussi des données géographiques pour leurs besoins propres. Les secrétaires d'État ont été particulièrement attentifs aux recommandations du rapport concernant :

- la nécessité de renforcer les collaborations entre acteurs publics autour de projets communs, afin d'assurer une meilleure coordination entre les organismes qui produisent des données géographiques ;
- l'intérêt de créer une géo-plate-forme nationale des données géographiques souveraines (infrastructure mutualisée) ;
- l'utilité que l'IGN se positionne pour animer la communauté au travers de la géo-plate-forme. Dans ce paysage, l'IGN est l'un des acteurs publics les plus à même de contribuer à assurer la certification de ces données.

► Rapport : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Rapport_DonneesGeographiquesSouveraines.pdf

Lauréats du prix Talents.START

Les Echos START a récompensé les 8 lauréats de son premier prix Talents.START à Viva Technology, le 26 mai 2018. Pour la première édition de ce concours, plus de 200 jeunes ont candidaté en seulement 15 jours. Ce prix récompense des jeunes de moins de 35 ans qui font bouger les lignes au sein de leur entreprise ou en créant leur propre structure. Quatre catégories étaient ouvertes pour cette première édition : les entrepreneurs Tech, les entrepreneurs sociaux, les intrapreneurs business, les ingénieurs intrapreneurs.

Dans la catégorie des ingénieurs intrapreneurs, Flavien Viguière a obtenu le prix du jury ; ce dernier est ingénieur géomètre, formé à l'INSA de Strasbourg. Après avoir débuté comme ingénieur d'affaires puis cartographe à la SNCF, Flavien commence à travailler sur un projet drones en 2011. Avec deux collègues, Flavien développe un projet intrapreneurial : monter une flotte de drones capables d'aider à la maintenance et à la surveillance du réseau. Le succès du projet permet à ce pôle drones de devenir en 2017 Altamétris, une filiale à part entière du groupe SNCF, qui compte aujourd'hui plus de 30 ingénieurs salariés. En 2018, Flavien a été nommé directeur général adjoint d'Altamétris.

NDLR : Bienvenue à Flavien qui a rejoint le conseil de l'AFT en juin dernier.

Quatre satellites Galileo supplémentaires sont en orbite

Ariane 5 a parfaitement réussi le mercredi 25 juillet, son troisième lancement de l'année, depuis le Centre Spatial Guyanais (CSG), en mettant en orbite les 23^e, 24^e, 25^e et 26^e satellites de la constellation Galileo, le programme européen de navigation par satellites. Le système européen de navigation par satellites Galileo est entré en service en décembre 2016 et il permet à l'Europe de disposer d'un système de navigation par satellites extrêmement précis, fiable et sécurisé. Ces quatre nouveaux satellites amélioreront encore la performance de la constellation qui offre à présent une précision et une variété d'utilisations jusqu'alors jamais atteintes. Ces quatre satellites, chacun d'une masse légèrement supérieure à 700 kg, ont été placés à 22922 km d'altitude, sur une orbite circulaire inclinée. Leur mise à poste définitive est réalisée par le CNES, depuis le Centre Spatial de Toulouse (CST) par environ 70 personnes, impliquées 24h/24 pendant 13 jours, avant que les satellites soient confiés au centre de contrôle Galileo, à Munich. Ensuite, le CNES joue un nouveau rôle majeur jusqu'au mois d'octobre, dans le calcul et la programmation de la vingtaine de manœuvres d'orbite nécessaires au positionnement final de chaque satellite.

Agenda des manifestations

- Du 5 au 7 octobre, FIG à Saint-Dié-des-Vosges - <http://www.fig.saint-die-des-vosges.fr/>
- Les 10 et 11 octobre, SIG2018 conférence francophone Esri aux Docks de Paris - <https://sig2018.esrifrance.fr/>
- Du 10 au 12 octobre, ISPRSTC I Midterm Symposium Innovative Sensing - From Sensors to Methods and Applications à Karlsruhe - <http://tc1-symposium2018.ipf.kit.edu/>
- Du 16 au 18 octobre, Intergeo à Francfort-sur-le-Main - <http://www.intergeo.de/intergeo-en/trade-fair.php>
- Les 23 et 24 octobre, Journées techniques de l'Association francophone d'hydrographie à Nantes <http://www.afhy.fr/index.php/journees-techniques/72-journees-techniques-f-2018>
- Du 26 au 30 octobre, Digital Heritage 2018, New Realities: Authenticity & Automation in the Digital Age à San Francisco, USA - <http://www.digitalheritage2018.org/>
- Du 29 octobre au 3 novembre, 6th International Euro-Mediterranean Conference (EuroMed 2018), International Conference on Digital Heritage focusing on Documentation, Preservation and Protection à Nicosie, Chypre, <https://www.euromed2018.eu/>
- Du 12 au 14 novembre, Colloque G2, Instrumentation nouvelle et combinaison d'observations géophysiques, à Montpellier - http://hydrologie.org/CONF/2018_G2.pdf
- Du 29 novembre au 1^{er} décembre, Fédération des géomètres francophones à Rabat - <http://www.geometres-francophones.org/>
- Du 6 au 8 février 2019, 3D Arch 2019, 8th International Workshop 3D-ARCH, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures à Bergame, Italie <http://www.3d-arch.org/>
- Le 28 mars 2019, Forum de l'AFT au lycée Loritz de Nancy
- Les 2 et 3 avril 2019, BIM World à la Défense, Paris - <https://www.bim-w.com/>
- Du 9 au 11 avril 2019, Ocean Business 19 à Southampton, UK <https://www.oceanbusiness.com/>

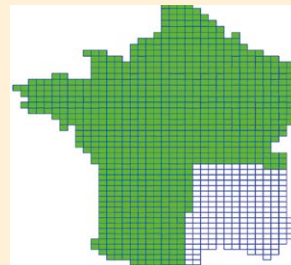
■ **Gratuité des services en ligne pour de nombreux acteurs publics**

L'IGN annonce la gratuité des services en ligne du Géoportail pour l'État et ses Établissements publics administratifs (EPA), les collectivités territoriales, les Établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI), ainsi que les Services départementaux d'incendie et de secours (SDIS). En complément de l'affichage de cartes, l'infrastructure Géoportail met à disposition de multiples services informatiques en réseau pour répondre à différents besoins : géocodage, calcul d'itinéraires, calcul d'isochrones, alticodage, etc. Ces services en ligne peuvent facilement être intégrés dans des sites web ou des applications à destination du grand public, mais aussi dans des logiciels métiers dédiés à un usage professionnel (SIG...). Désormais totalement gratuits pour l'État et ses EPA, les collectivités territoriales, les EPCI et les SDIS, la tarification de ces services pour les utilisateurs du secteur privé est fonction de l'usage et du nombre de transactions. Ces organismes peuvent ainsi utiliser les fonds de carte diffusés par la plate-forme Géoportail gratuitement pour les proposer dans leurs applications web et mobiles ou les utiliser dans leurs service d'information géographique (SIG).

► **Informations :** <https://www.geoportail.gouv.fr/actualites/choisir-les-services-en-ligne-du-geoportail>
<https://geoservices.ign.fr/documentation/>

■ **Et si vous testiez la nouvelle grille RAF18 ?**

Comme nous l'avions déjà annoncé dans les colonnes de XYZ le service de géodésie de l'IGN va bientôt mettre à disposition la nouvelle grille RAF. Comme les précédentes RAF98 et RAF09 elle permet de convertir des hauteurs au-dessus de l'ellipsoïde GRS80/RGF93 en altitudes IGN69, ce qui est indispensable pour utiliser les méthodes GNSS (GPS) pour déterminer des altitudes. Cette nouvelle grille est élaborée à partir du nouveau quasi-géoïde QGF16 adapté sur 10 600 points GNSS nivelés issus du processus ERNIT¹ et doit assurer le centimètre sur la zone couverte par ces travaux d'entretien du réseau de nivellement (zone verte sur la carte ci-contre), et les 2 à 5 cm ailleurs.

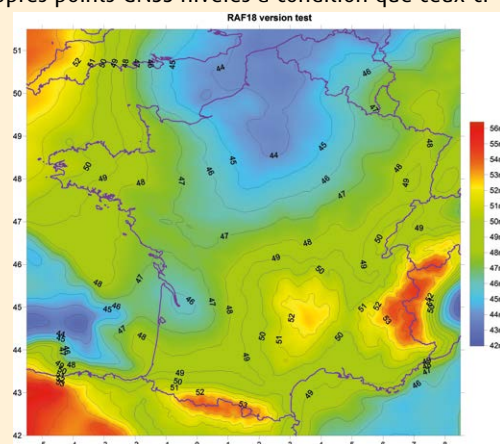


La grille RAF18 est en phase de qualification externe, c'est-à-dire à partir de données non IGN. Vous pouvez obtenir cette grille en avant-première et la tester à partir de vos propres points GNSS nivelés à condition que ceux-ci soient déterminés avec une grande précision, c'est-à-dire :

- rattachés au RGF93, via les stations du RGP, par des observations GNSS statiques d'au moins une heure,
- rattachés au réseau de nivellement IGN69 par nivellement de précision à partir d'au moins trois repères de nivellement.

► **Si vous êtes partant contactez le responsable IGN François L'ÉCU (francois.l-ecu@ign.fr).**

(1) F. Duquenne, A. Coulomb, F. L'Écu "La démarche française de modernisation de sa référence verticale" revue XYZ n°143 pages 21-28 – Juin 2015



FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2019



L'Association française de topographie (AFT) et le lycée Henri Loritz, Nancy (Meurthe-et-Moselle)



LORITZ

accueillent

le 15^e Forum de la topographie

le jeudi 28 mars 2019

29 rue des Jardiniers 54000 Nancy

Réservez votre journée !

Contact exposants : communication@aftopo.org

Yves Robin-Jouan ami, marin et géomètre

C'est par un court message du Groupe International de Croisière (<http://gic-voile.fr/>) que j'ai appris le décès tragique et accidentel d'Yves au printemps dernier.

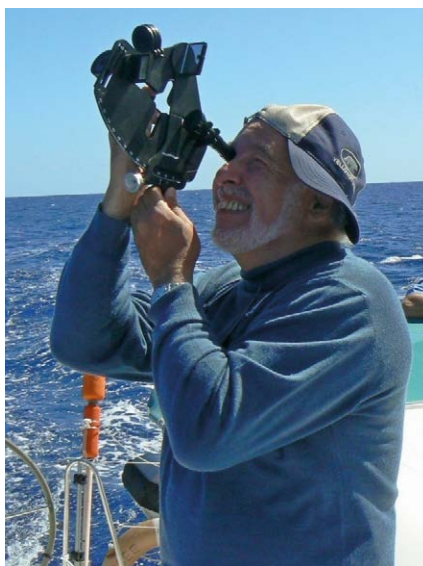
Yves et moi avons navigué ensemble pour la première fois au printemps 2002, une semaine tranquille et agréable pour faire le tour de Majorque, en équipage réduit. Nous nous sommes apprivoisés, appréciés et j'ai pu au cours des longues conversations que nous avons eues commencer à mesurer son immense culture dans tous les domaines – historiques, culturels et techniques – qui touchent à la navigation et à la détermination du point en mer.

Yves était un équipier chaleureux, à la conversation savoureuse, savante et enthousiaste, attentif à chaque personne à bord, toujours délicat. Il était aussi un chef de bord compétent et apprécié au GIC.

Nous avons tous deux appris à calculer avec des tables trigonométriques, des tables de log et une règle à calcul, appris à naviguer avec un sextant, dépensé des fortunes pour acquérir les premières calculatrices en notation polonaise inversée, puis les premiers micro-ordinateurs, appris le DOS et le BASIC, puis d'autres langages... Nous partagions le même tropisme pour la géométrie et la mécanique céleste. C'est important, difficile à comprendre j'imagine pour les plus jeunes lecteurs.

Il m'a fait découvrir, avec verve, patience et gentillesse, sa Méthode du Plan des Sommets, le fonctionnement technique de la constellation GPS, puis les algorithmes qu'il a imaginés pour initialiser un récepteur GPS quand les singularités foisonnent. Il a vite compris que j'aimais comprendre ce qu'il expliquait, et il aimait expliquer, argumenter, convaincre, partager.

Après cette première croisière, nos rencontres furent peu nombreuses, mais nous avons entretenu une longue conversation par courriels. Dès 2004, je lui ai demandé d'accompagner, de coacher on dirait de nos jours, un de



mes étudiants, Pierre, un étudiant brillant qui allait rentrer à Polytechnique et qui souhaitait faire son TIPE (travail d'initiative personnelle encadré) sur les techniques du point en mer. Ça tombait bien ! Yves a été formidable : il l'a guidé, a relu et repris son travail au fur et à mesure que celui-ci prenait forme, il l'a invité chez lui, lui a montré ses plus beaux jouets et Pierre a obtenu une excellente note après son oral. Des étudiants, il y en a eu quelques autres au cours des années suivantes quand le thème annuel du TIPE s'y prêtait. Yves les a pris en charge, toujours gentil et patient. Même lorsqu'il constatait que les capacités en calcul et l'intuition géométrique n'étaient pas toujours là. Il avait à cœur de leur donner accès à certains concepts courants (les approximations successives, la mesure de l'erreur dont le "DOP" qu'il expliquait admirablement ou la méthode des moindres carrés). Grâce à ses exemples et contre-exemples, extraits de situations concrètes, dont il était féru, il réussissait presque toujours.

Quand il commença la rédaction de son livre "Navigation aux Astres et aux Satellites par la Méthode du Plan des Sommets", il m'a confié la relecture des chapitres, les uns après les autres, je confesse y avoir appris beaucoup de choses, j'ai dégusté, savouré ce travail immense de vulgarisation scientifique. Je n'ai pas eu grand-chose à

corriger, l'œuvre était dans son esprit depuis longtemps. Je souhaite que beaucoup de marins et de géomètres la découvrent un jour, j'en ai conseillé la lecture à certains, qui l'ont trouvée ardue, malgré toute la pédagogie dont il fait preuve au fil des pages et toutes ces figures et illustrations qui ont dû lui demander un énorme travail. Mais ça vaut le coup !

Il y aurait beaucoup d'autres choses à dire sur Yves, les articles qu'il a publiés dans diverses revues dont celle-ci, son logiciel ASTROLAB de navigation astronomique, qui intégrait la Méthode du Plan des Sommets et une base de données d'éphémérides, etc.

André Nanta, un de ses amis proches, également chef de bord au GIC, témoigne : *"J'avais suivi l'exposé qu'il a donné au local du club sur sa Méthode du Plan des Sommets, et les incertitudes du GPS en certaines circonstances, telles que l'effet de puits dans une rue bordée d'immeubles denses de grande hauteur. Il avait des talents de vulgarisateur permettant à un public intéressé par le sujet, de comprendre sans avoir son niveau d'ingénieur. La clarté de ses dessins en 3 dimensions permettant de comprendre sa théorie du plan des sommets en est le meilleur exemple. Hormis la théorie, il avait également la pratique et je me souviens d'une semaine de navigation ensemble dans le cadre du GIC au départ de Bandol, avec pour objectif la pratique du sextant et détermination de sa position. Bien que la mer fut agitée avec un vent proche de 5 Beaufort, il fit merveille alors que d'autres étaient momentanément HS.*

Yves était connu dans le milieu scientifique. L'ouvrage "Histoire du point astronomique en mer" de Jean-José Ségéric, paru en avril 2006 à Marines éditions, lui consacre quelques pages."

Il était un ami, un marin, un géomètre et le restera dans mon souvenir.

FL.

La rédaction s'associe dans cet hommage, à la famille et aux amis d'Yves Robin-Jouan.

Rapport moral de l'année 2017 présenté à l'assemblée générale de l'AFT le 21 juin 2018 à l'IGN - Saint-Mandé

■ **Mathieu KOEHL** Secrétaire général

L'assemblée générale précédente s'est tenue le 22 juin 2017 à Saint-Mandé dans les mêmes locaux de l'IGN, elle avait été précédée d'une assemblée générale extraordinaire qui a permis de faire évoluer les statuts.

Une nouvelle année s'est écoulée et cette assemblée générale permet de faire le bilan des principaux épisodes qui ont marqué la vie de l'AFT durant l'année 2017.

Nous reprenons les mêmes thématiques que les années précédentes pour pouvoir comparer ces évolutions d'année en année.

Le fonctionnement administratif

■ **Fonctionnement**

L'AFT comporte près de 400 membres et 150 abonnés. Elle gère plusieurs publications dont la revue trimestrielle XYZ, une lettre numérique d'actualités (diffusée trois fois par an), un lexique en pleine refonte ainsi que d'autres publications sur lesquelles nous reviendrons plus tard. La relation avec d'autres associations et organismes fait également partie des actions importantes. Enfin, un forum annuel depuis quelques années déjà fait également partie des événements incontournables de la vie de l'association.

Toute cette gestion repose sur un secrétariat actif, sur un conseil composé de membres actifs, sur des bénévoles assidus, sur une messagerie électronique omniprésente, sur des visioconférences percutantes, sur un site Internet vitrine ouverte sur le monde et surtout sur une présidente et un rédacteur en chef actifs et toujours aussi dynamiques.

Véronique Melin a poursuivi le secrétariat, dont la gestion du courrier, la facturation et la gestion des adhé-

sions et abonnements sont des points essentiels. À travers des permanences les mardis après-midi et les jeudis, Véronique Melin a continué à être un relais physique de l'AFT tout en assurant la diffusion et l'archivage des courriers à l'arrivée et au départ de l'AFT.

Cette assemblée générale nous permet de remercier Véronique Melin pour son rôle dans l'association.

Mais le fonctionnement de l'AFT repose de plus en plus sur quelques personnes et responsabilités essentielles. Notre Présidente, Françoise Duquenne revient lors de chaque conseil sur les actions décidées et fait le suivi de l'application des décisions, elle propose des améliorations dans le fonctionnement et des évolutions de l'AFT. Nous remercions ici une fois de plus tous les membres actifs pour leur engagement et les invitons à poursuivre leurs efforts en toute sérénité.

Le fonctionnement de l'AFT repose également sur son organisation et sa structure.

En 2017, année impaire, il n'y a pas eu de changement dans l'équipe. C'est lors de la présente assemblée générale qu'un tiers du conseil sera renouvelé.

■ **Site web : <http://www.aftopo.org/>**

Le site Internet fonctionne en régime établi, géré par "La souris magique", sous la houlette de Tania Landes proposant des nouveautés et des améliorations au conseil. En 2017, une réflexion sur la refonte du site a été initiée, celle-ci n'a pas encore abouti à ce jour.

Le paiement en ligne, fonctionnalité importante du site, attire toujours plus d'utilisateurs, il permet notamment de régler sa cotisation ou d'effectuer des achats d'ouvrages en ligne.

Comme à l'accoutumée, nous rappelons dans ces lignes que les sommaires des revues XYZ peuvent être téléchargés, les articles ou des revues complètes au format numérique peuvent y être achetés. À compter du numéro 150 le téléchargement est gratuit pour l'adhérent.

L'accès au Lexique topographique reste gratuit. Comme déjà indiqué, des commissions "lexique" sont en train de travailler sur les chapitres existants pour les refondre, les mettre à jour et les compléter, d'autres pour proposer de nouveaux chapitres.

Une première avancée importante a été obtenue avec la publication en ligne du Lexique GNSS pour le positionnement réalisé en collaboration avec la commission GEOPOS du CNIG.

Les présentations données lors des Forums de la Topographie sont accessibles via le site (2013, 2014, 2017 et déjà 2018).

Une rubrique "emplois" relaye des offres transmises à l'AFT.

Les liens vers les "partenaires" sont actualisés.

La base de données des membres / adhérents / abonnés reste la base de données de référence.

Une "Dropbox" indépendante est ouverte aux membres volontaires du conseil. Les documents y sont archivés et peuvent être consultés à distance.

■ **Forum 2017 (16 mars 2017)**

L'AFT a organisé son 13^e Forum en 2017 à l'ENSG sur les "Géoservices".

Celui-ci a remporté un vif succès avec 130 participants et une quinzaine de stands. La journée s'est très bien déroulée grâce à l'organisation sur place de Serge Botton. L'ENSG est toujours apprécié par les nombreux exposants et les participants. Les thématiques



des conférences concernaient donc les "Géoservices" :

"Présentation de l'offre des Géoservices IGN" par Sofiane Kriat

"Les calculs GNSS en ligne : exemple du SGN" par Elise Rachel Mathis

"Scodify : la solution en ligne d'intégration de DAO vers SIG au service de la cartographie des réseaux enterrés" par Jean-Loup Delaveau

Grand bravo aux organisateurs.

Les adhésions et comptes financiers

Au 31/12/2017, les relances ciblées ainsi que l'arrivée de quelques nouveaux adhérents ont permis de stabiliser le nombre d'abonnés/adhérents à 533 (contre 568 en 2016).

La situation financière de l'Association est restée saine malgré une conjoncture toujours difficile (cf. rapport financier). Les mouvements atteignaient un peu plus qu'une centaine de milliers d'euros en 2017 avec un excédent de l'ordre de 9 k€.

Nous remercions ici Michel Trouillet pour le suivi très rigoureux de l'état des finances de l'AFT, transmettant toutes les données au cabinet d'expertise comptable chargé du suivi des comptes mais qui n'a pas totalement joué son rôle en 2017.

L'AFT remercie également très chaleureusement Samuel Guillemain et Jacques Riffault pour leurs efforts incessants dans la recherche et la réalisation de partenariats tant pour la revue XYZ que lors des forums. Ils ont, cette année encore, réussi à convaincre les partenaires fidèles de poursuivre leur soutien de l'AFT dans un intérêt commun.

Les conseils

L'association a tenu quatre conseils en 2017, à Saint-Mandé dans les locaux de l'IGN et à l'INSA de Strasbourg :

- Le 9/03/2017 : le conseil n° 133, à l'IGN, Saint-Mandé.
- Le 22/06/2017 se sont tenus l'Assemblée Générale Extraordinaire, l'Assemblée Générale et le conseil n° 134, à l'IGN, Saint-Mandé.
- Le 21/09/2017 : le conseil n° 135, à l'INSA de Strasbourg.

- Enfin, le 14/12/2017 le conseil n° 136, à l'IGN, Saint-Mandé.

La participation des membres du conseil est toujours satisfaisante, le quorum était atteint à chaque séance. Des conseils ont également été tenus à Saint-Mandé avec une liaison par Skype avec Strasbourg.

Au cours des séances, le conseil, après débat, décide des actions majeures engagées par l'Association :

- Les séances commencent par un point sur les actions décidées lors des conseils précédents.
- Le point sur la situation financière de l'AFT est incontournable. Le bilan des comptes permet de suivre l'évolution des recettes et des dépenses pour tendre vers un budget équilibré.
- L'état d'avancement et les prévisions de publication de la Revue XYZ, notamment les articles, rubriques sont analysés et présentés à chaque séance. Un comité de rédaction se réunit régulièrement pour analyser les propositions de contenu et les valider sous la houlette du rédacteur en chef.
- L'évolution de la publicité et des partenariats, outre leurs aspects financiers de première importance, y sont également évoqués et discutés.
- Le Forum à présent incontournable dans son édition annuelle reste un événement connu, reconnu et attendu. En 2017, le Forum à l'ENSG a été bien suivi.
- Les résultats du Prix de l'AFT y sont évoqués. Celui-ci est délivré lors du forum suivant.
- Le site web de l'AFT est l'une des vitrines qui continue à jouer son rôle primordial. Sa maintenance et son évolution sont décidées et débattues. Comme déjà évoqué, une commission a été mise en place fin 2017 pour repenser le site web suite à une reprise de "La souris magique" par un autre prestataire. Cette démarche n'a pas encore abouti, mais sera l'une des décisions importantes à prendre en 2018.
- Le point est également fait sur les réseaux sociaux : l'AFT dispose de comptes sur Facebook, Twitter et LinkedIn, initiés et modérés par Bernard Flacelière.
- La "lettre d'actualités topographiques" de l'AFT, dernière-née des publications

était gérée par Jean-François Hullo. Emmanuel Cledat a repris le flambeau en 2017. Cette lettre comporte trois éditions annuelles, en février, mai et novembre. Elle est transmise sous forme numérique à tous les adhérents ayant fourni une adresse mail.

- Le lexique et le travail des commissions sur les différents chapitres à reprendre ou à compléter.

En voici une liste non exhaustive :

- 1 - Généralités
 - 2 - Théorie des erreurs
 - 3 - Systèmes de référence de coordonnées
 - 4 - Mesure des longueurs
 - 5 - Mesure des angles
 - 6 - Positionnement par GNSS
 - 7 - Déterminations planimétriques
 - 8 - Détermination des altitudes
 - 9 - Méthodes de levé
 - 10 - Méthodes d'implantation
 - 11 - Cadastre et travaux fonciers
 - 12 - Traitement des données : compensation et théorie des erreurs
 - 13 - Représentation cartographique
 - 14 - Photogrammétrie
 - 15 - Lasergrammétrie
 - 16 - Traitement de nuages de points
 - 17 - Système d'Information Géographique
 - 18 - Hydrographie
- Le calendrier des manifestations et des participations de l'AFT est remis à jour à chaque séance.

L'année 2017 a vu la concrétisation de l'effort porté sur la modification des statuts et l'écriture d'un règlement intérieur (votés en AG extraordinaire et AG). Les avancées majeures dans ce domaine consistaient :

- à autoriser l'utilisation du numérique pour les convocations et les votes,
- à autoriser les procurations pour les votes en conseil,
- à alléger certaines règles pour les votes en AG.

Les statuts ont été réduits au strict minimum en reportant dans le règlement intérieur certaines dispositions des anciens statuts, facilitant ainsi leurs mises à jour. Le règlement intérieur, lui, a permis de mettre par écrit des principes de fonctionnement jusqu'alors connus de certains et uniquement transmis de manière orale. Ces deux textes ont été validés par les adhérents



en assemblée générale extraordinaire en juin 2017.

Les publications

■ La revue XYZ

En 2017, sont parues à nouveau quatre nouvelles revues XYZ toujours aussi séduisantes, fascinantes et inédites.

En termes de volume, les revues comportaient respectivement : n° 150 (76 pages), n° 151 (84 pages), n° 152 (76 pages), n° 153 (80 pages).

Le rythme trimestriel des publications a été bien respecté. Les rédacteurs poursuivent la recherche de la diversité dans tous les domaines de la topographie. Les différentes rubriques proposées par la revue sont toujours en rapport avec les problématiques de la topographie moderne et future : les "brèves des constructeurs" et "infotopos", les articles techniques et scientifiques, la revue littéraire et professionnelle, les "récréations mathématiques", la "topo vécue", la vie des associations et la vie des écoles sont toujours aussi intéressants et permettent aux lecteurs d'avoir un aperçu très large des évolutions de la topographie.

En tant que rédacteur en chef, Bernard Flacelière continue à garder la revue captivante en emmenant un comité de rédaction vers des exigences élevées. Le comité de lecture, composé de nombreuses personnalités, analyse, corrige et donne son aval sur les contenus des publications.

Ainsi, les différents numéros [de 150 à 153] de 2017 comportaient respectivement :

- des "Infostopo"
- des rapports sur les différentes manifestations (5+4+3+6 rapports) et parmi les classifications thématiques de la revue :
- Géodésie/GNSS (6+0+2+2 articles)
- SIG/Géomatique/Géoservices (0+2+2+0 articles)
- Topographie/Topométrie (0+0+0+1 article)
- BIM (0+5+0+1 articles)
- Drone (2+0+0+0 articles)
- Droit (0+0+0+1 article)
- Cartographie/PCRS (0+0+0+3 articles)
- Histoire (0+1+1+2 articles)
- Photogrammétrie (1+0+1+0 article)

- Lasergrammétrie (0+2+0+1 articles)
- Hydrographie (0+1+1+0 articles)
- Foncier/Cadaastre (0+2+0+0 articles)

Le tout complété par les rubriques "Art et géométrie" (1+1+1+1 articles) et de la Topographie et des Géomètres sans Frontières "TSF/GSF" (1+1+1+0 articles), Et encore quelques autres rubriques en plus...

Comme chaque année, il s'agit à cet endroit d'apprécier le travail rigoureux et inventif de Dorothée Picard qui grâce à ses talents de conception et son art de la mise en page nous permet d'offrir aux lecteurs une revue non seulement riche en contenu mais également très enchanteresse.

Plusieurs exemplaires, anciens ou nouveaux, ont été vendus en plus en 2017.

■ Autres publications

- Numéro Hors-série : "Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique" (Paul Courbon)
- Numéro Hors-série "Méthodes GNSS pour la Topographie"
- "Lexique topographique"
- "Sciences géographiques, connaissance du monde et conception de l'Univers dans l'Antiquité" (Raymond D'Hollander)
- "Mesurer la Terre - 300 ans de géodésie française" (Jean-Jacques Levallois)
- "Le marégraphe de Marseille" (Alain Coulomb)
- "Art et géométrie" (Jean-Pierre Maillard)
- "Les références de temps et d'espace" (Claude Boucher)
- "Lexique GNSS pour le positionnement" de la commission CNIG / GEOPOS
- "Cours de géodésie" (Françoise et Henri Duquenne)

■ Publication numérique

Une lettre d'actualités topographiques de l'AFT est publiée numériquement et transmise aux abonnés et à une liste de personnes ayant donné leur adresse de messagerie afin de rester en relation avec l'AFT, au rythme de 3 par an.

Les manifestations

L'AFT s'est montrée et s'est exposée

dans différentes manifestations en 2017, dont les suivantes :

Janvier

- Le 7^e ApéroGéo de l'AFIGEIO à la maison de la RATP.
- DécryptaGéo 2017 à l'ENSG.

Février

- Séminaire sur les gravimètres à atomes froids, CNFGG à l'IGN.
- Colloque BIM aux confluences de la technique et du droit à l'ESGT.

Mars

- Colloque "Photogrammétrie et télédétection : vers la convergence ?" à l'ENSG.
- 10^e édition du Géoséminaire SILAT à Montpellier.
- Forum de l'AFT avec le thème "Géoservices" à l'ENSG.
- BIM World à Paris La Défense.

Avril

- 142^e congrès du CTHS (Comité des travaux historiques et scientifiques) avec le thème "Circulation montagnarde" à Pau.

Mai/Juin

- "Atelier télédétection radar : applications continentales" à l'ENSG.
- FIG *Working Week* 2017 à Helsinki (Finlande).
- Journée GNSS et la science, CNES, Paris.
- Géom@TICE à l'ENSG.
- Université d'été des Géomètres-experts au Mans.
- Lidar for drone Yellowscan, Montpellier.

Juillet

- IGS Workshop à Paris.
- Innovative City à Nice.

Août/Septembre

- CIPA 2017 à Ottawa (Canada).
 - Conférence francophone de l'information géographique (AFIGEIO) à Strasbourg.
 - Journées de la Topographie à l'INSA de Strasbourg.
 - Séminaire sur les spécifications des levés et travaux hydrographiques, SHOM Saint-Mandé.
 - Journées techniques AFHY à Cherbourg.
 - BIM World universities, Paris La Défense.
 - Intergeo à Berlin.
- Octobre*
- Festival International de Géographie à Saint-Dié-des-Vosges.





- SIG2017 - Conférence ESRI à Paris.
- *Colloquium of Scientific and Fundamental Aspects of GNSS* à Valence (Espagne).

Novembre

- Colloque G2 à Nice.

Décembre

- Le CercleGéo organisé à l'ESGT au Mans.

Et bien d'autres...

Le Prix AFT 2016, remis en 2017

Il n'y a eu que trois articles qui ont été primés. Ils ont été présentés lors du Forum de l'ENSG et publiés dans la revue XYZ.

Le prix a entièrement été financé par la Société Leica Geosystems que nous remercions ici pour la poursuite de son engagement auprès de l'AFT.

Section régionale de Belgique et du Luxembourg

Mi-décembre, Joël Van Cranenbroeck a organisé une réunion avec une vingtaine de membres potentiels en prévision de la création de la "Section régionale de Belgique et du Luxembourg". Il y a eu adhésion des membres belges et luxembourgeois qui souhaitent se constituer en section régionale. Sa mise en place et l'élection du représentant local devront être validées par une assemblée générale.

Ainsi se termine ce bilan récapitulatif de l'année 2017 !

L'AFT progresse dans ses engagements pour le développement et la diffusion des connaissances en Topographie.

Nous rappelons chaque année à l'occasion de ce bilan que l'AFT met tout en œuvre pour conserver son rang parmi

les associations reconnues dans les différents milieux professionnels qu'elle touche de près ou de loin.

Les actions d'amélioration concernent :

- l'attractivité et la fidélisation des adhérents,

- le développement de nouveaux partenariats tout en conservant les partenaires fidèles,

- la veille technologique et scientifique dans tous les aspects de la topographie et des domaines connexes,

- l'accès aux informations et à la connaissance par l'intermédiaire des ouvrages, de "La lettre d'actualités topographiques de l'AFT", de la "revue XYZ" et du "Lexique" grand chantier de 2018.

Pour finir, l'AFT remercie ici encore vivement l'IGN pour son soutien, notamment pour le prêt des locaux et des infrastructures. ●

Prix de l'AFT 2018 pour les Jeunes Ingénieurs diplômés en Topographie

Les étudiants des écoles d'ingénieurs sont invités à soumettre au comité de rédaction de la revue XYZ un article portant sur leur travail de fin d'études d'ingénieur géomètre-topographe. Les meilleurs articles seront récompensés et publiés dans la revue XYZ.

Un montant global de 2 000 euros est prévu en 2018, pour attribution en 2019.

Conditions de participation

- être âgé(e) de moins de 26 ans ;
- joindre l'attestation du diplôme d'ingénieur ;
- proposer au comité de rédaction de la revue XYZ un article de 6 pages au moins en français (environ 4 000 mots, avec mots clés et un résumé en français et anglais), en vue d'une publication dans la revue, rajouter une présentation sommaire de son parcours (résumé du curriculum vitae) et suivre les consignes aux auteurs qui sont téléchargeables sur le site de l'AFT : www.aftopo.org ;
- soumettre le texte avec une proposition de mise en page (texte / illustrations) sous format PDF et joindre en fichiers attachés le texte seul en format modifiable (docx ou équivalent) avec les images et illustrations aussi en fichiers séparés intégrables (JPG ou équivalent) en résolution de 300 dpi minimum ;
- l'article doit être proposé et rédigé par le(la) candidat(e) seul(e). L'article soumis ne peut pas faire mention de "co-auteurs". Si le candidat souhaite signaler un travail mené en équipe dans le cadre d'un projet plus large, il ajoutera une note de remerciements introductive ou conclusive de son texte ;
- certifier que l'article n'a pas été soumis ou publié dans une autre revue ;

- la date limite pour la proposition des articles est le 31 octobre 2018 (pour les projets présentés dans les écoles cette année et les précédentes).

L'adhésion à l'AFT, dont l'abonnement à la revue XYZ, pour l'année 2019 sera offerte aux participants.

Comité d'attribution

Le comité de rédaction de la revue XYZ, assisté du conseil de l'association, est chargé de désigner le jury d'attribution du Prix de l'AFT et son président. Ce comité pourra associer un ou plusieurs représentants d'écoles françaises. La qualité du contenu scientifique et de la rédaction de l'article sont les critères essentiels retenus.

Publication des résultats

- les candidat(e)s seront informé(e)s individuellement des résultats au plus tard le 31 décembre 2018 ;
- les résultats du concours seront publiés dans la revue XYZ dans l'année suivant la publication des résultats ;
- le président du jury du prix ou son(sa) représentant(e) remettra le ou les prix à l'occasion d'une manifestation organisée par l'AFT.

Merci de transmettre votre proposition au président du jury du prix de l'AFT, par courriel à l'adresse suivante : [prixaft\(at\)aftopo.org](mailto:prixaft(at)aftopo.org)



L'Ordre des géomètres-experts à Bordeaux pour son 44^e congrès

Géomètre-expert garant d'un cadre de vie durable !



C'est en la bonne ville de Bordeaux que l'OGÉ a fait escale pour son congrès bisannuel. Joseph Pascual, président de la région ainsi que tous les organisateurs sont arrivés à créer une atmosphère conviviale et sympathique malgré la taille du palais des congrès de Bordeaux Lac. Les 1 500 participants, dont 840 géomètres-experts ont pu suivre ou participer aux débats puis arpenter la cinquantaine de stands des nombreux partenaires présents à l'appel. Le thème du congrès, "Bâtir ensemble notre avenir" nous permet des débats participatifs et donc des prises de positions tranchées.



Les séances plénières

Une scénographie d'exception, animation, vidéo, sons et lumières, emmenée par les co-rapporteurs Vincent Saint-Aubin et Séverine Vernet et bien sûr par l'entraînante animatrice Sophie Gastrin, journaliste, nous a donné une fluidité, un intérêt, une efficacité aux présentations et débats.

Sans vouloir décrire en détail chaque présentation, il suffira juste de noter celles qui m'ont semblé les plus marquantes. Lors de la séance d'ouverture, comme grand témoin, Laurence Parisot (ancienne présidente du Medef) insiste sur l'éthique chez les profession-

nels, l'esprit d'entreprise, puis bien sûr l'Europe et termine sur une ode à l'environnement, dans ce contexte actuel d'extinction des espèces et du changement climatique. Elle est donc restée dans l'air du temps. Marc Luyckx Ghisi, l'attachant philosophe et théologien belge de 76 ans nous entraîne forcément vers des hauteurs éthérées en nous narrant les diverses mutations de l'humanité. Celles-ci commençant par les chasseurs-cueilleurs se terminent par une société plus humaniste, quel incorrigible optimiste. Notre collègue Rani el Meouche, enseignant à l'ESTP et membre du conseil de l'AFT, est plus pessimiste sur l'évolution de la nouvelle génération, pourrait-on dire la génération Z comme zappeur ? Elle est connectée, branchée d'une part mais aussi démotivée, impatiente d'autre part. Rani insiste sur le rôle de l'ingénieur qui valide, qualifie, expertise et non qui exécute ou fait fonctionner matériel et logiciel.

Je ne résiste pas à souligner quelques mots d'esprits entendus lors de ces sessions plénières, de Marc Luyckx, déjà cité : "Le géomètre-expert doit inventer la mesure qualitative, utiliser l'intelligence en réseau et être un facilitateur", et dans la rubrique sur la recette du bonheur d'être géomètre-expert, d'encore Marc Luyckx : "Vivez votre aventure intérieure", puis de Frank Salles, coach en entreprise : "Pas d'excellence sans plaisir". Finalement, Michel Podolak, chef d'orchestre nous confie : "Le chef d'orchestre n'est pas ordonnateur il est un facilitateur".

Les géomètres étrangers sont impressionnés !

Ils le sont, eux qui viennent, soutenus par la Fédération des géomètres francophones, du Maghreb, d'Afrique sub-saharienne, du Canada et même



d'Europe. Sous la houlette de Marc Vanderschueren président de la FGF, ils pensent tous au prochain événement à tenir à Rabat fin novembre 2018 et notamment l'organisateur Khalid Yousfi, président de l'ONIGT. Il verrait bien dans le congrès de Bordeaux un modèle à suivre.

Les motions et les votes

Cartons rouges et cartons bleus sont agités ostensiblement pour signaler respectivement son adhésion ou son désaccord aux propositions de motions. Sans surprise, avec plus ou moins de consensus, les motions suivantes ont été adoptées :
motion 1 : le DPLG sera ouvert aux masters de droit,
motion 2 : les procès-verbaux de bornage seront publiés,
motion 3 : une politique de spécialisation garantie par l'Ordre sera mise en œuvre,
motion 4 : par l'inter-professionnalité, un service global et complet sera apporté au client.

Rendez-vous en 2020 en Martinique pour le 45^e congrès !

Le lecteur est invité à se rendre sur la revue *Géomètre* n°2160 de juillet – août 2018 pour disposer d'un tableau plus complet de l'événement avec 40 pages dont plusieurs dédiées aux événements post-congrès. ●

Bernard Flacelière

Le congrès de la FIG à Istanbul, carrefour de civilisations



■ Bernard FLACELIÈRE – Anne GIRARDIN – Jean-Pierre MAILLARD

Istanbul, Constantinople, Byzance, cité historique de près de 3 000 ans nous propose de revivre les riches heures qui ont façonné ce carrefour de civilisations. Chaque vue sur le Bosphore, chaque coin de rue, chaque monument nous rappellent Grecs, Perses, Romains, Latins, Génois, Vénitiens, Ottomans. Les rues commerçantes sont organisées par type d'artisanat et de marchandise : plomberie, électricité, plâtre, peinture, vaisselle, cuisine, chaussures, tissus, robes, habits pour hommes, instruments à vent, puis à cordes, puis à percussion, et même les armes à feu. Une foule de clients erre en quête du Graal. Entre chaque échoppe, une tchakhana, maison de thé pour se désaltérer, voire le kahvehane où le café turc, autant à boire qu'à manger, est servi. Et le soir, les rues sont vides, faisant place aux petits restaurants dans des endroits magiques comme l'ancienne cour de justice sise à Galata.



Café turc savouré au bazar



Le thème du congrès

Du 6 au 11 mai 2018 la Turquie et Istanbul ont accueilli le 26^e congrès de la fédération internationale des géomètres (FIG) dont l'AFT et l'ordre des géomètres-experts (OGE) sont adhérents pour la France. Ce faisant, ils assurent sa représentation au sein d'un ensemble de 103 organisations professionnelles actives dans 89 pays. Les 2 300 participants (800 étrangers et 1 500 Turcs) étaient invités à échanger et mettre en commun leurs idées sur le thème "Embracing our smart world where the continents connect : enhancing the geospatial maturity of societies" que l'on peut traduire par

"Étreindre notre monde intelligent où les continents se connectent : améliorer la maîtrise géospatiale des sociétés." En suggérant le mouvement, celui de la mondialisation, de la connexion et des réseaux, le logo du FIG 2018 est facile à lire : il montre une cartographie du Bosphore, qui dessine bien la Corne d'Or, surchargée d'une stylisation des trois bandes du logo du FIG soulignant le lien entre l'Europe et l'Asie par les trois ponts sur le Bosphore et l'internationalisme de la fédération.

Qu'est-ce que la FIG ?

Rappelons que la FIG est une organisation internationale non gouvernementale (ONG) créée en 1878, dont l'objet, au service du progrès de la profession de géomètre, est de soutenir la collaboration internationale dans tous ses domaines et applications (pratique professionnelle, enseignement, gestion de l'information spatiale, hydrographie, etc.) et d'en assurer une représentation notamment auprès de l'ONU et de la Banque mondiale, qui la reconnaissent. Dix commissions ont été



Le centre des congrès d'Istanbul



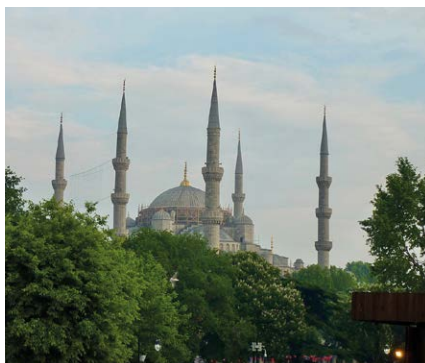
constituées pour travailler sur chacun des domaines et, en tant que de besoin, organiser des séminaires dédiés. Sur le plan général la FIG propose à ses membres un rendez-vous annuel à savoir un congrès statutaire tous les quatre ans ou une semaine de travail (*Working week*) les autres années, un pays étant élu pour recevoir la manifestation. C'est ainsi que l'on connaît dès maintenant la destination pour 2019 (Hanoï – Viêt-Nam), 2020 (Amsterdam – Pays-Bas), 2021 (Accra – Ghana) et 2022 (Le Cap – Afrique du Sud), prochain congrès, cette dernière destination étant votée en séance. Le site de la FIG www.fig.net apporte tous compléments d'information.

Le participant néophyte est frappé par le déroulement rituel de l'assemblée générale et des sessions plénières tout empruntées d'une solennité certaine qui débutent généralement par l'écoute de l'hymne de la FIG, tous les participants debout. L'ambiance protocolaire est aussi soulignée par le collier porté, en l'occurrence par la présidente, qui attire tous les regards, ou encore, faisant suite à l'annonce de leurs organisation et pays, le défilé des votants pour l'approbation des rapports quadriennaux, le vote pour l'élection des membres du bureau de la fédération, etc., la conférence des présidents rythmant la semaine du congrès.

Dans cet esprit, la journée mondiale du géomètre décrétée le 21 mars de chaque année ajoute à la panoplie des signifiants de la fédération.

La centaine d'organisations membres de la FIG représentent près de 250 000 professionnels dont 40 % d'Italiens, 33 % de Britanniques et 7 % d'Américains pour les nations dont les adhérents sont les plus nombreux. Avec les 2 400 adhérents de l'AFT et de l'OGE la France compte numériquement pour 1 % en relation avec son poids démographique à l'échelle mondiale. La proportion s'est aussi vérifiée dans le prorata des participants puisque l'on a compté cinq membres de l'OGE, deux de l'AFT et deux indépendants soit neuf Français sur 800 étrangers.

Son audience est toutefois renforcée par la francophonie, une cause bien



La mosquée bleue ou Sultan Ahmet Camii

servie par la fédération des géomètres francophones (FGF), créée en 2005 à Rabat qui rassemble déjà 27 organisations. XYZ rend régulièrement compte des actions de la FGF (éthique, formation...) désormais présidée par le Belge Marc Vanderschueren successeur de François Mazuyer.

Sur le plan professionnel, chacune des dix commissions, portée par la volonté de partager expériences et connaissances, a proposé aux congressistes des conférences et autres tables rondes sur les thèmes dont elle a la charge. C'est finalement 400 interventions qui ont mobilisé l'attention comme le salon professionnel qui a réuni 108 exposants. Une place a été réservée à l'expression des jeunes "*surveyors*" sans malheureusement qu'on ait pu identifier un seul francophone (voir chapitre sur le *Young Surveyors Network*). La prédominance de l'anglais occulte certainement l'expression de ceux qui ne le pratiquent pas suffisamment et c'est regrettable. Dans ces conditions, la dynamisation des sessions francophones par des présentations plus techniques doit profiter de l'ouverture d'une 3^e session francophone annoncée, aux côtés de sessions russophones et hispanophones également espérées, à la *Working Week* 2019 d'Hanoï.

La vie des commissions

Voici les quelques points clés issus des conclusions des réunions de commissions et des présentations :

- commission 1, standards et pratiques professionnels : progression du processus de mise en place d'un réseau de femmes chez les géomètres-topogra-

phes, encouragement à la mixité dans le métier de géomètre-topographe (voir le mot d'Anne Girardin),

- commission 3, gestion de l'information spatiale : mises à jour des outils numériques, production participative (*crowdsourcing*),
- commission 4, hydrographie : information spatiale côtière et maritime, passer de la durabilité à la productivité et à la régénération,
- commission 5, positionnement et mesure : l'importance des systèmes géodésiques de références dynamiques, surveillance des risques par géodésie, GNSS et numérisation par scanner laser,
- commission 7, cadastre : nécessité d'établir des systèmes d'administration foncière durables basés sur des cadres juridiques et un engagement politique plutôt que des projets à court terme, gestion des terres dans les zones urbaines en croissance, y compris l'acquisition de données à partir d'appareils simples et intelligents, amélioration de la qualité des données et des services grâce à l'intégration des communautés,
- commission 8, planification et développement spatial : mettre l'accent sur la capacité d'adaptation en matière d'aménagement du territoire, promouvoir des approches intégratives en matière d'aménagement urbain et régional, favoriser les relations entre zones urbaines et rurales,
- commission 9, évaluation et gestion de l'immobilier : mise en évidence de la nécessité d'une approche créative adaptée aux problèmes mondiaux croissants, de nouveaux outils sont disponibles pour mieux gérer puis utiliser notre terre,
- commission 10, économie et gestion en construction : atelier avec 3 sessions techniques et des présentations sur les bases du BIM, les SIG BIM et les meilleures pratiques en BIM.

Conclusion de la vie des commissions : ne rien laisser de côté – les personnes, les lieux de la planète – accompagner la prospérité par le partenariat. Le slogan étant en anglais et guère traduisible avec son jeu typographique, voici l'original : *Leave no one behind – People – Places – Prosperity – Partnership – Planet.*



Le rôle de la femme dans la profession, le mot d'Anne Girardin

Alors que j'ai été invitée par la FAO pour discuter du rôle de la femme géomètre pour la sécurisation des droits fonciers des femmes sur leur terre, avec quelques collègues de la commission 1, nous avons eu une première réunion pour créer une nouvelle commission appelée pour le moment *Women in Surveying*, c'est-à-dire, les femmes dans le monde des géomètres au sens large. Cette commission devrait s'articuler autour de 3 piliers :

- réfléchir sur la condition des professionnelles que nous sommes dans un monde dominé plutôt par les hommes,
- aider des femmes dans le monde à devenir géomètre, en particulier dans des endroits comme en Afrique de l'Ouest où il n'y en a guère,
- aider les professionnelles à soutenir la sécurisation foncière des femmes dans le monde entier, et spécifiquement dans des pays où les droits fonciers des femmes sont encore bafoués.

Les actions de cette commission ne sont pas encore définies, la première étape étant de créer la commission ensemble, femmes et hommes membres de la FIG et intéressés par le thème.

Kate Fairlie, qui était présidente de la commission *Young Surveyors*, les jeunes géomètres, fait partie de la commission.

J'invite maintenant mes collègues à rejoindre ce qui doit devenir *Women in Surveying - France*. (NDLR : la rédaction



La traversée du Bosphore en vapör

se fera un plaisir de faire suivre à Anne les courriels envoyés à info@aftopo.org).

FIG Young Surveyors Network (FYSN), le réseau des jeunes géomètres-topographes

Effleuré au paragraphe précédent, ce réseau mérite qu'on s'y attarde. Quels sont les buts de ce réseau qui s'adresse aux jeunes ? Il s'agit :

- d'augmenter le nombre de jeunes professionnels qui participent aux activités de la FIG,
- d'aider les jeunes professionnels en début de carrière avec des réseaux de contacts,
- de renforcer la coopération entre les commissions, les réseaux d'étudiants et ceux des jeunes professionnels.

Le représentant de l'AFT s'est inquiété du peu de francophones présents dans le réseau de la *FIG-Young Surveyors' Network* (FYSN), contrairement aux Nord-Américains, Africains anglophones, Asiatiques et Nord-Européens. Ceux-ci sont actifs, organisent des

événements, trouvent des sponsors et des supports pour y participer. Le réseau Européen (YSEN) est lui supporté par le CLGE (Comité de liaison des géomètres européens).

Pourtant la majorité de nos écoles imposent ou favorisent la mobilité des étudiants à l'étranger dans le cadre de période de scolarité ou de séjours bénévoles dans des ONG. Pourquoi les étudiants français ou francophones n'utilisent-ils pas ce formidable réseau de la FIGYSN aux fins de prospection, accueil local et ouverture à l'international. ●

L'AFT et sa revue XYZ souhaitent favoriser cette ouverture et proposent ci-dessous les contacts, références et réseaux sociaux.

Site web : <http://www.fig.net/organisation/networks/ys/index.asp>

Courriel : fig.youngsurveyors@gmail.com

Vidéo de présentation de Eva-Maria Unger, présidente 2015-2018 : <https://youtu.be/F0nGLLb3TAs>

Facebook : <https://www.facebook.com/groups/26072565877/> ou rechercher FIG Young Surveyors

Linked In : <https://www.linkedin.com/groups/1957180/profile> ou FIG Young Surveyors Network

Twitter : https://twitter.com/fig_young?lang=en

► **Pour en savoir plus : le programme technique et les comptes rendus sont accessibles sur le site de la FIG à l'adresse : http://fig.net/fig2018/technical_program.htm**

Rendez-vous à Hanoï du 22 au 26 avril 2019.

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 / télécopie : 03 87 98 57 04
Courriel : o.reis@infonie.fr

Pour toutes vos traductions d'allemand
et d'anglais en français en topographie
– géodésie –
géomatique – GNSS

Reinhard 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
Courriel : stoelzel@aol.com

Pour toutes vos traductions de français
et d'anglais en allemand en géomatique
– GNSS –
infrastructures de transport

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service

La cartographie mobile et le géoréférencement précis de réseaux souterrains

■ Garance WELLER - Quentin DARTAILLH

Depuis une quinzaine d'années, les systèmes de cartographie mobile terrestre se développent, offrant des moyens de collecte d'information géolocalisée à grande échelle et de haute précision. Aujourd'hui de nombreuses solutions existent, la plupart intégrant différents capteurs ou solutions considérés comme complémentaires : lidar et caméras optiques, systèmes de positionnement globaux par satellite, multi-constellations, et stations de base terrestres mobiles ou fixes de forte densité, etc. Les données sont traitées et exploitées au travers de logiciels tiers dédiés, soit directement par l'utilisateur final, soit via des prestations de service. Nous présentons ici et évaluons l'utilisation d'une solution intégrée de cartographie mobile basée sur de l'imagerie optique seule pour les relevés terrain et d'un système d'information géographique associé pour le repérage et la cartographie en 3D des réseaux linéaires enterrés dans le cadre de la réforme anti-endommagement des réseaux sensibles.

Description du système de cartographie mobile

Imaging, société française basée à Toulouse, conçoit et développe un système complet et intégré de cartographie mobile terrestre depuis les premières années de mise sur le marché de ces solutions (2008). L'idée de départ, fil conducteur encore aujourd'hui, étant la simplicité de mise en œuvre et d'utilisation pour répondre à des besoins clients et utilisateurs non experts en solutions techniques de géomesures ou en logiciels de traitement de données ou bien encore en systèmes d'information géographique. Cette solution intégrée a dès le départ été constituée de trois parties intrinsèquement liées, le matériel, le logiciel de production et les services en ligne offrant une solution complète de bout en bout.

Le matériel, outil de terrain d'acquisition des données géoréférencées, se compose d'une caméra avec capteur CCD de 5 mégapixels et d'une optique

grand angle de 5 mm, d'un récepteur GNSS, d'une centrale inertielle, d'un baromètre, d'une batterie et d'une antenne GNSS se fixant sur le boîtier. L'ensemble étant très compact, d'un poids total n'excédant pas 2 kg. Cette caméra se monte à l'aide de pieds articulés équipés de ventouses sur le toit de tout type de véhicule routier, ou derrière le pare-brise pour les applications ferroviaires. Les relevés peuvent se faire à vitesse normale autorisée jusqu'à 130 km/h sans aucune incidence sur la qualité des relevés. La facilité de mise en œuvre, l'autonomie et la capacité de stockage en font un outil permettant de capturer de l'information de terrain sur plusieurs centaines de kilomètres par jour. Les données étant enregistrées sur une clé USB de 64 Go pour un volume moyen de 250 Mo/km.

Le calcul de la position et de l'orientation de chaque image capturée se fait à partir des données brutes enregistrées par l'ensemble des capteurs embarqués. La solution finale de

MOTS-CLÉS

Cartographie mobile, 3D, réseaux linéaires, solution intégrée, SIG

positionnement et d'orientation des images est le résultat de l'hybridation de toutes ces mesures. Un algorithme propriétaire breveté permet de prendre en compte le flux optique comme source supplémentaire d'information sur le déplacement de la caméra entre chaque image et ainsi d'améliorer davantage la solution de navigation finale, en particulier en environnement GNSS difficile.

L'étape ci-dessus se fait en post-traitement et permet de faire des mesures dans les images ou positionner des objets en 3D grâce à des outils photogrammétriques disponibles dans le logiciel développé en parallèle *imajview*®. Ce logiciel a été conçu comme un véritable système d'information géographique permettant de construire un projet dans sa globalité, de créer des couches de géoinformations décrites grâce à des modèles de données configurables, exportables dans des formats standards.

Des développements plus récents (2017) permettent de générer de l'information de profondeur, habituellement fournie par la technologie lidar, grâce à la combinaison de différentes approches algorithmiques et l'expertise multiple des ingénieurs en recherche et développement d'imaging : traitement d'image, navigation et positionnement et optimisation de code. Cette information de profondeur est restituée par une carte de profondeur derrière l'image, permettant de calculer immédiatement les coordonnées en 3D de l'élément pointé dans l'image, tout comme cela se fait dans un relevé mixte imagerie et lidar, mais avec cependant un volume de données à manipuler et à stocker de 4 à 10 fois



Figure 1. Nuages de points générés à partir des images d'un seul passage



inférieur. Des fonctionnalités spécifiques à la manipulation de ces cartes de profondeur sont intégrées dans le logiciel SIG, aux côtés des outils photogrammétriques, pour laisser libre choix à l'utilisateur.

L'information de profondeur permet également de produire des nuages de points géoréférencés, pouvant être utilisés dans les logiciels dédiés pour faire des mesures, de la digitalisation, de la modélisation 3D ou les intégrer dans un modèle numérique de terrain (figure 1). Ils seront exploitables dans le logiciel SIG pour lesquels des fonctionnalités spécifiques sont en cours de développement.

En termes de précision des mesures faites dans les images, les résultats sont identiques, que ce soit en utilisant des outils photogrammétriques ou des outils de mesure en 3D. Les écarts observables ne seront dus qu'à une réduction des erreurs de saisie de l'utilisateur en mode 3D. La technologie et les spécifications techniques de la solution imajing permettent d'annoncer des précisions de mesures (précision relative) de 3 % pour des objets jusqu'à 20 m de la caméra.

La précision absolue de référencement est fortement liée à la solution de positionnement utilisée. La précision augmente sensiblement en utilisant en complément un récepteur RTK appliquant les corrections D-RTK. Bien qu'annoncée comme décimétrique, l'expérimentation terrain a démontré une précision absolue comprise entre 5 et 10 cm dans de bonnes conditions.



Figure 2. Configuration du montage spécifique de l'imajing®

Le géoréférencement de réseaux enterrés

C'est dans ce cas de figure que nous présentons ici plus en détails l'utilisation de la solution imajing pour le référencement des réseaux souterrains, dans le cadre de la mise en application de la loi anti-ndommagement des réseaux sensibles par le décret DT-DICT. La solution de cartographie mobile est utilisée à la



Figures 3 et 4. Visualisation sur les images des marquages au sol

suite de la détection sur le terrain par méthodes traditionnelles (détecteurs de boucles magnétiques, détecteurs de réseaux), et repérages visuels.

Le besoin exprimé étant de pouvoir visualiser et digitaliser, avec une précision élevée, les éléments affleurants et visibles des réseaux enterrés sur des images géoréférencées prises par la caméra : bouches à clé, plaques et marquages au sol.

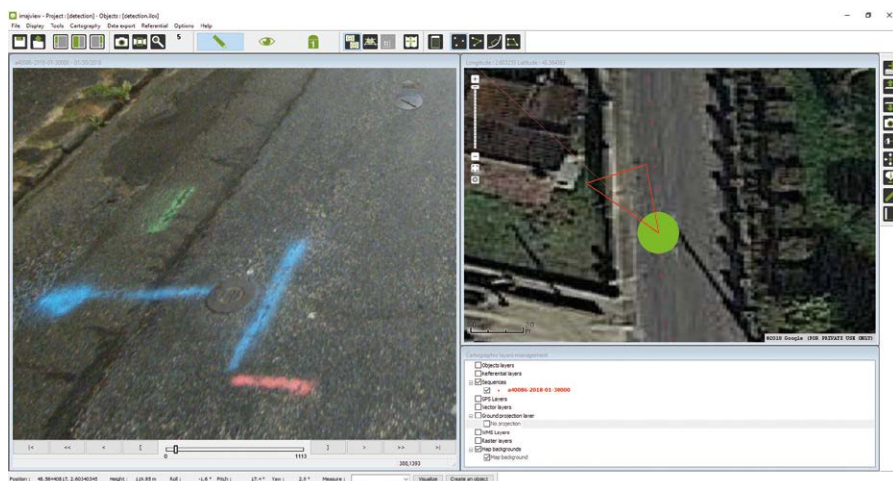


Figure 5. Saisie d'un point sur une première image

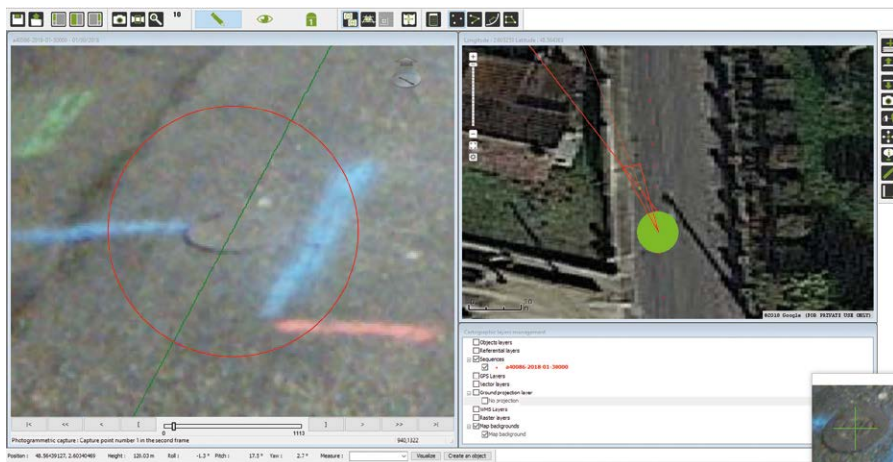


Figure 6. Saisie du même point sur l'image précédente, qui doit se trouver sur la ligne indicatrice

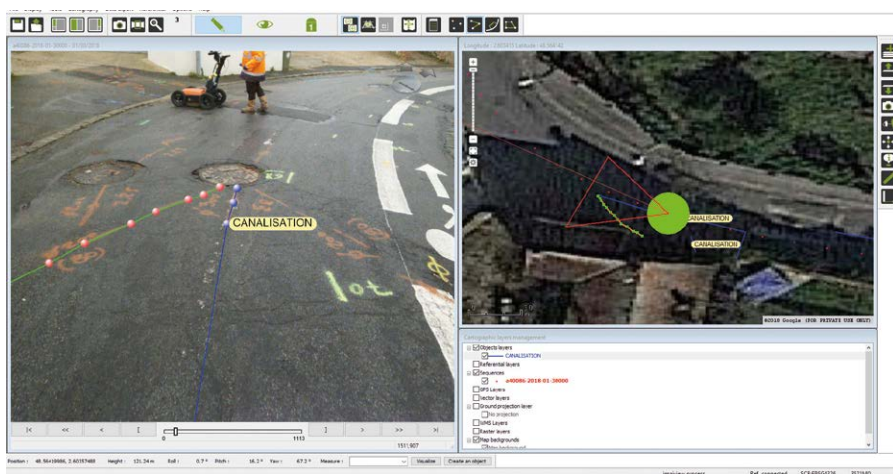


Figure 7. Digitalisation des canalisations et étiquetage

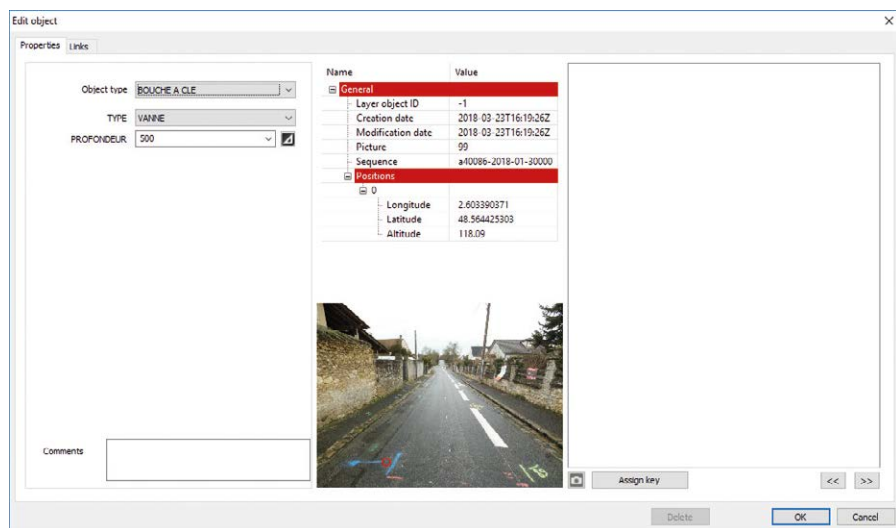


Figure 8. Création de l'objet "Bouche à clé" et ses attributs

Afin d'obtenir la meilleure précision possible, un récepteur externe RTK, dans ce cas précis le modèle AsteRx-U de Septentrio, est utilisé pour les relevés images. La caméra est installée sur le toit d'un véhicule professionnel, inclinée vers le sol à 30° environ

(figure 2), le récepteur externe étant à l'intérieur. Les rues sont parcourues à vitesse constante de 50 km/h, dans un sens puis dans l'autre. Les images géoréférencées prises par la caméra permettent d'identifier clairement les marquages au sol faits lors

des relevés terrain et par conséquent les objets et zones à digitaliser (figures 3 et 4).

La saisie des bouches à clé, des plaques et des marquages au sol matérialisant les canalisations se fait en mode photogrammétrique pour une meilleure précision de positionnement et de mesure. Pour ce faire, il faut saisir une première fois le point ou la ligne sur une image dans laquelle ils sont bien apparents, puis refaire exactement la même saisie dans l'image précédente enregistrée par la caméra lors du relevé (figures 5 et 6). Le logiciel SIG proposant automatiquement cette image à l'opérateur.

Les objets d'intérêt et leurs attributs, type, sous type et profondeur dans l'exemple ci-dessous, sont enregistrés en base de données dans des couches géographiques (figures 7 et 8). Le modèle de données est entièrement configurable en fonction de la nature du projet.

Les couches géographiques créées sont exportables dans différents formats standard (shapefile, CSV, kml) ainsi que les traces GPS et les images au format JPEG.

Cette approche nouvelle dans le domaine, à la demande de bureaux d'études, présente des avantages certains en termes de gain de temps et de mise en œuvre par rapport à l'approche traditionnelle. Les relevés images étant extrêmement rapides, et se faisant dans le trafic normal routier, sans besoin de l'interrompre. Les précisions centimétriques des relevés topographiques ne seront jamais atteintes, mais nous avons constaté que 5 à 10 cm de précision absolue sont réalistes en utilisant un récepteur externe RTK. Le modèle haut de gamme de la prochaine version de l'Imagbox® intégrera directement cette technologie dans la solution de positionnement.

Nous avons constaté également que l'utilisation de technologie de cartographie mobile requiert un temps de prise en main et d'intégration dans des outils ou dans des méthodes de travail déjà en place qui ne doit pas être négligé.



Plus généralement

Depuis le lancement de la commercialisation de la première solution en 2010, la technologie est utilisée pour des usages de plus en plus nombreux et variés à travers le monde. Sa simplicité de mise en œuvre, les faibles volumes de données par km et la rapidité de traitement en font une solution de cartographie mobile abordable.

Les contraintes réglementaires et financières des gestionnaires d'infrastructures les amènent à utiliser des technologies performantes afin d'optimiser les opérations, de réduire les coûts et d'accroître la récurrence des contrôles. La digitalisation permet par ailleurs plus d'interopérabilité entre les parties prenantes, améliore la fiabilité et la sécurité des données.

L'inventaire des actifs et du mobilier urbain est bien sûr une des applications importantes : candélabres, panneaux de signalisation, places de parkings, panneaux publicitaires, panneaux d'adressage, poteaux électriques, arbres, etc. Tous ces objets sont positionnables et mesurables dans les images pour être répertoriés et décrits précisément dans des couches géographiques, permettant de créer, compléter ou modifier des états des lieux.

De ces inventaires découlent naturellement les projets de gestion, de maintenance, de planification des opérations : réfection des marquages au sol, entretien de la chaussée, réparation de glissières de sécurité, élagage des arbres, entretien de pistes cyclables, et bien d'autres.

Conclusions

Les mises en œuvre de réglementations sont souvent des leviers pour le développement de l'usage de nouvelles technologies. ETCS dans le domaine ferroviaire en Europe, loi MAPAM, loi NOTRe, réforme anti-endommagement des réseaux sensibles en France et de nombreuses autres en Europe et dans le monde. De plus, la digitalisation des métiers de la construction et de la maintenance d'infrastructures est en route et ne

fait que commencer. S'équiper d'un système de cartographie mobile est un investissement financier direct, mais également indirect en temps de formation et d'intégration dans des méthodes de travail existantes, parfois très éloignées des fonctionnements des systèmes d'information géographique. Cependant le virage DAO vers les SIG est amorcé. Il peut et va permettre la diversification des activités de service et une approche plus globale de la gestion des infrastructures. ●

Contacts

Garance WELLER

Directeur des ventes
gweller@imajing.org

Quentin DARTAILH

Ingénieur d'application terrain
Responsable support et formation
qdartailh@imajing.eu

ABSTRACT

For fifteen years, terrestrial mobile mapping systems have been developing and improving, offering great means for massive and precise georeferenced data collection. Today there are many solutions available on the market. Most of them integrate different sensors or technical solutions, considered as complementary: lidar and optical cameras, global satellite positioning systems, multi constellations, and high density total positioning stations, fixed or mobile, etc. The data is processed and used through dedicated third parties software, either directly by the end users or with a service provider company. We are presenting and evaluating here the usage of an integrated solution of mobile mapping based on a single optical camera for field data acquisition and its associated geographic information system for detection and 3D models of linear underground networks in the framework of the French reform relative to anti damage of sensitive networks.

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BAILLY André,
ingénieur, Paris

BOTTON Serge,
ingénieur, ENSG Marne-la-Vallée

CHRISMAN Nicholas,
rédacteur, sciences géographiques
(États-Unis)

CLÉDAT Emmanuel,
doctorant, EPFL (Suisse)

DUQUENNE Françoise,
ingénieur général des ponts, des eaux
et forêts honoraire, Saint-Contest

DURAND Stéphane,
maître de conférences, ESGT Le Mans

GRUSSENMEYER Pierre,
professeur des universités,
INSA Strasbourg

HULLO Jean-François,
Dr.-Ing., ingénieur de recherche,
EDF R&D, Clamart

KASSER Michel,
professeur des universités,
HEIG-VD (Suisse)

KOEHL Mathieu,
maître de conférences, INSA Strasbourg

LANDES Tania,
maître de conférences, INSA Strasbourg

MAILLARD Jean-Pierre,
géomètre-expert foncier,
Marne-la-Vallée

MAINAUD DURAND Hélène,
ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique,
ingénieur topographe, CERN Genève

MOREL Laurent,
maître de conférences, ESGT Le Mans

NATCHITZ Emmanuel,
ingénieur, EIVP Paris

PANTAZIS N. Dimos,
professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent,
directeur du CESBIO, Toulouse

REIS Olivier, ingénieur,
traducteur Sarreguemines

ROCHE Stéphane,
professeur, Université Laval (Québec)

TROUILLET Michel,
ingénieur topographe, Lyon

VIGUIER Flavien,
ingénieur topographe, ALTAMETRIS, Paris

À l'Etna avec les étudiants de l'École normale supérieure la multidisciplinarité en action

■ Bernard FLACELIÈRE - Louise LE VAGUERESSE - Arnaud OLLIVIER - Luca TERRAY



Sur les bords du cratère de la Bocca Nuova

et visites culturelles, scientifiques ou tout simplement touristiques.

C'est la 8^e édition de cette expédition et il me tarde d'en comprendre les rouages. Pierre qui a usé ses semelles Vibram sur l'Etna lors de sa coopération militaire dans les années 80 confesse dans une interview de mars 2010 : "J'aimerais recommencer à étudier l'Etna, c'est sans doute le volcan le plus intéressant au monde, il est facile d'accès, très bien ausculté, on peut travailler à la fois sur les données à venir et sur une mine de données déjà acquises. C'est précisément parce que ce volcan est très bien étudié, qu'il faut l'étudier encore plus. C'est souvent en étudiant encore plus des objets que l'on croit déjà bien connaître que la science avance". Et voici que l'idée prend corps et que l'expédition annuelle explore toutes les facettes qu'un normalien en géosciences doit connaître et maîtriser. De la géologie à la volcanologie, en passant par la météorologie, la géodésie, la télédétection, la chimie, la climatologie, l'hydrographie, l'astronomie, tout y est abordé ou approfondi. Les sciences humaines ne sont pas oubliées, cette année un littéraire est présent, donc histoire, archéologie, sociologie, linguistique sont au programme. Finalement le plus important dans cette expédition est la part personnelle laissée à l'étudiant pour l'organisation pratique, y compris le financement, donc la recherche de partenaires puis la communication avant et après l'événement.

De 19 à 23 ans les étudiants brillent par leur trajectoire, montrent une maturité peu commune et une très forte culture générale. Quoique géoscientistes, ils n'hésitent pas à approfondir d'autres domaines, quitte à profiter d'une année de césure pour ce faire. La plupart

La Bocca Nuova ou le nouveau cratère (la nouvelle bouche) est un des points sommitaux de l'Etna à plus de 3300 m d'altitude où l'activité volcanique est soutenue. Casqués, Luca et Bernard arpentent le bord du cratère puis en font le tour pour vérifier la bonne santé des dosimètres à radon implantés dans l'année. Certains supports en bois sont déjà carbonisés, le sol jaunâtre couvert de soufre affiche 30 à 35°C au thermomètre, les effluves de gaz obligent le port du masque. Le fond du cratère est caché par les fumées et les vapeurs mais on devine par d'inquiétantes détonations que le volcan vit activement. En effet des jets de matériaux noirs, des fragments magmatiques, sortent du nuage en dessous de nous et fort heureusement retombent dans l'abîme sans passer au-dessus de la crête. Que font donc ces volcanologues, chevronné et amateur, au pays d'Héphaïstos et de Vulcain ?

Pourquoi ne pas répondre à une sympathique invitation ?

Par Bernard Flacelière, AFT

C'est par une discrète sollicitation que Pierre Briole, président actif de la commission géo-positionnement du CNIG, enseignant à l'École normale supérieure, un émérite volcanologue autant que géodésien m'a invité à l'expédition Etna 2018 de l'ENS. Connaissant le goût de votre rédacteur en chef pour les sommets sous toutes les latitudes,

ne vous étonnez pas de le trouver arrivant à l'aéroport de Catane et retrouvant Tony le chauffeur attitré du B&B Porta dell'Etna à Nicolosi, au pied du volcan, où l'expédition tient ses quartiers.

La dizaine d'étudiants plus les accompagnateurs sont à pied d'œuvre, consultez les récits ci-dessous, dans une ambiance studieuse qui sent tout de même les vacances. Tous les jours on se lève tôt et les journées sont bien équilibrées, entre celles très physiques avec de 1000 m à 1 600 m de dénivelées et celles plus intellectuelles avec véhicules tout-terrain



© BF

Une partie du groupe en action



d'entre eux ont déjà voyagé et acquis une expérience internationale, dans les études, les relations et forcément la linguistique.

Pierre participe également au projet EDUMED OBS, l'Observatoire de l'environnement méditerranéen à but éducatif et débouchant sur Insegnaci Etna 2018, une nouvelle école de terrain pour les enseignants en Sicile (<http://edumed.unice.fr/fr>). C'est peut-être pour cela qu'il tournera la page et que la 9^e expédition ENS@Etna2019 se fera sans lui, il passe la main, mais promet d'y participer en candidat libre et pour le plaisir.

Concernant cette expédition, voici donc un exemple réussi de mise en situation de jeunes apprenants sur des lieux remplis d'opportunités de découvertes et d'études, en compagnie d'ainés riches en expériences professionnelles. Merci à Pierre pour cette sympathique invitation !

Mais passons la parole à quelques protagonistes : à Louise, de l'équipe d'organisation, qui nous résumera en avant-première le synopsis du film à paraître, à Arnaud passé maître dans l'initiation des néophytes aux méthodes GNSS et finalement à Luca le consciencieux traqueur de radon qui nous fait l'honneur de la couverture.

L'expédition Etna 2018 vue par une étudiante

Par Louise Le Vagueresse, géosciences à l'ENS

Quoi de plus mystérieux et fascinant qu'un volcan, une entité vivante qui, avec des explosions tonitruantes et des hémorragies magmatiques, est capable d'enfanter les roches neuves de ce monde ? Quoi de plus fascinant également que ces hommes qui, malgré le danger, continuent de vivre à proximité de ces volcans, de les étudier et de les adorer ?

Dix étudiants en master et en troisième année de licence de géosciences et

un étudiant en master de linguistique de l'École normale supérieure se sont piqués d'intérêt pour ces questions et sont partis en expédition pendant près de deux semaines en Sicile, sur l'Etna, le volcan le plus actif d'Europe, accompagnés de Pierre Briole et de Jean Chéry, chercheurs géophysiciens, de Luca Terray, doctorant en géochimie, d'Arnaud Ollivier ingénieur géomètre-topographe et responsable technique à Geotopo, d'Henri Laur docteur à l'Agence Spatiale Européenne et de Bernard Flacelière, ingénieur géomètre-topographe et rédacteur en chef de la revue.

L'idée était d'en apprendre plus sur le fonctionnement physique d'un volcan en discutant avec plusieurs chercheurs, tout en s'intéressant aux perceptions des populations qui vivent à son contact. La première étape a été de visiter l'INGV, l'Istituto Nazionale de Geofisica e Vulcanologia de Catane et sa salle de surveillance où deux personnes, présentes 24 h sur 24 h, surveillent les signaux envoyés par les différents instruments déployés tout autour du volcan afin de repérer les indices de l'imminence d'une éruption de façon à en avertir à temps les autorités et les compagnies aériennes. Nous avons assisté à une série de petites conférences sur l'inclinomètre, un instrument qui permet de mesurer la variation de pente des flancs du volcan et donc d'estimer son gonflement. Plusieurs journées ont ensuite été consacrées à des mesures sur le terrain pour nous familiariser avec les instruments et nous permettre de faire un point sur le contexte géochimique et géodynamique

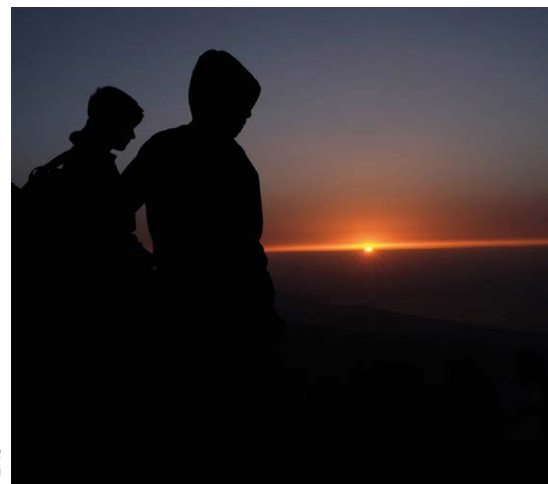


Simon en action pour une mesure GNSS

© ENS



© ENS



© ENS

On a trouvé l'inclinomètre dans le tunnel de lave

de la Sicile en général et du volcan en particulier. Celui-ci nous a été expliqué par nos accompagnateurs ou par des chercheurs de l'INGV.

Des mesures GNSS ont été réalisées avec Pierre Briole et Arnaud Ollivier dans la vallée *del Bove*, vaste paysage de laves et de désolation situé à l'est du volcan, probablement issu de l'effondrement d'un ancien cratère qui se serait brusquement vidé de son magma, comme un fondant au chocolat dont on aurait percé la base. Ces mesures permettent donc, d'une part, de mesurer son déplacement vers la mer, et d'autre part de connaître l'épaisseur de la dernière coulée de lave ayant recouvert cette vallée. L'épaisseur du panache, à savoir l'ensemble des gaz et des aérosols qui sortent en permanence du volcan, a également été mesuré en compagnie de Luca Terray sur une crête surplombant la vallée, et des capteurs destinés à en analyser la composition ont été installés au sommet du cratère. Au cours de la visite de l'observatoire astronomique à *Serra de la Nave*, Henri Laur nous a donné une conférence sur les divers satellites *Sentinel* de l'ESA.

Nous avons bien évidemment profité des paysages de Sicile, notamment lors d'une journée passée sur les monts Iblei, ou encore le jour où nous avons emprunté la route qui fait le tour du volcan. Là, de nombreux blocs de lave, de viscosités différentes, forment des motifs en cordes. L'un de nous avait également réussi à localiser un ancien inclinomètre camouflé dans un tunnel de lave par notre professeur pendant sa thèse dans les années 80.

© BF

Et comment ne pas résister, le lendemain, à la tentation d'aller admirer le lever du soleil depuis le sommet ? La montée s'est faite de nuit, avec lampes frontales et bâtons de marche pour pouvoir prendre le petit-déjeuner sur la crête en regardant l'astre empanaché émerger de l'horizon et illuminer la vallée en contre-bas.

Au cours de cette expédition, nous avons également eu l'occasion de visiter des infrastructures humaines endommagées par le volcan ou qui ont été plusieurs fois reconstruites : un ancien monastère de bénédictins, reconstruit plusieurs fois sur une coulée de lave, et qui abrite aujourd'hui la faculté de lettres et de philosophie de Catane,

Levé de soleil sur la mer Ionienne

des routes et des villages traversés par des failles, le refuge de Sapienza et son téléphérique, reconstruit en moyenne tous les cinq ans. Nous avons aussi pu constater à quel point le volcan était présent dans l'architecture sicilienne, que ce soit dans une cathédrale construite en pierres de lave, dans les statues de lave disséminées à travers la ville de Catane, les pavés de ses rues faits du même matériau et le théâtre de Taormine conçu de manière à avoir une vue sur le volcan depuis ses gradins

Nous avons vu aussi à quel point les humains avaient colonisé ces reliefs, par le biais des refuges qui les parsèment, ou celui des vergers et des vignes qui adoucissent les flancs noirs du volcan.



L'Etna depuis le théâtre de Taormine

► Nous avons recueilli de nombreux témoignages de ses habitants, de guides qui conduisent les touristes au sommet ou dans le dédale du monastère, de cultivateurs, de commerçants et d'habitants de Catane qui nous ont raconté de nombreuses anecdotes, heureuses, comiques ou tragiques. Ils nous ont ainsi laissé entrevoir la relation complexe et ambiguë que ces gens entretiennent avec **la mama Etna** comme on l'appelle là-bas. Et ce sont ces témoignages et ces paysages à la fois simples et grandioses que nous aimerions transmettre à notre tour.

C'est dans ce but que nous avons réalisé un film documentaire exposant ce que nous avons appris tout au long de cette expédition. Ce dernier est projeté cet automne à l'École normale supérieure, mais il est également mis en libre accès sur YouTube et accessible via la page Facebook de l'expédition Etna 2018 (@Vivreaucoeurduvolcan). Le titre de ce film ? Vivre à l'ombre du volcan.

Compréhension des mouvements gravitaires et tectoniques grâce aux relevés GNSS

Par Arnaud Ollivier, ingénieur ESGT, responsable support technique à Geotopo

Réputé pour être le volcan le plus actif d'Europe, l'Etna subit de fortes pressions naturelles et est en continuel mouvement.

C'est dans la vallée *del Bove*, située sur le versant sud-est, que l'équipe composée de chercheurs et étudiants de l'ENS a commencé les mesures pour modéliser ses mouvements et les comprendre : voir si les déplacements sont homogènes et à quelle échelle.

Les points observés il y a plus de 30 ans lors de différentes expéditions, et mesurés précisément en GPS, ont depuis été recouverts de téphra (éjectas, du grec $\tau\epsilon\phi\rho\alpha$, cendres) lors d'éruptions successives.

Toute la difficulté réside dans le fait de retrouver ces points en positionnement GPS (ou maintenant GNSS puisque multi-constellations) autonome sous une épaisse couche de cendres et de

roches. Des premières fouilles ont été réalisées quelques jours auparavant, mais de façon approximative à partir des coordonnées initiales. Après mesures de points retrouvés, il a été constaté un décalage de 3 mètres vers l'est. Sur les points encore enfouis, il a été appliqué ce même décalage de 3 mètres afin d'obtenir de nouvelles coordonnées approximatives, proches de celles des points restants à déterrer. Pour y arriver, l'expédition a bénéficié du matériel prêté par Geotopo, distributeur agréé Trimble, pour poursuivre les fouilles. C'est à l'aide du dernier récepteur Trimble Alloy et du GNSS Trimble R10, tous deux dotés de la technologie Trimble RTX Centerpoint, qui permet un positionnement centimétrique en temps réel sans connexion GSM/IP, que les derniers points ont été

précisément découverts sous 15 cm de téphra. Les corrections étant récupérées via un satellite géostationnaire, les recherches sont effectuées en comparant les coordonnées théoriques du point avec celles données par le récepteur en temps réel, ce qui permet de naviguer vers le point.

La technologie Trimble RTX Centerpoint a donc permis de retrouver des points difficilement détectables dans ces conditions.

L'autre objectif de cette mission était de mesurer la hauteur des coulées de lave en allant vers le cratère qui se situe au milieu de la vallée *del Bove*. Des points avaient été positionnés mais le tout a été recouvert après leurs installations par une autre coulée de lave. Connaissant la position de ces derniers à quelques dizaines de centimètres près, on va pouvoir se placer à la verticale du point, relever les coordonnées GNSS avec le Trimble Alloy, récepteur en temps réel et calculer l'épaisseur de la coulée de lave. On a constaté une hauteur de lave d'environ 13 mètres sur les extrémités de la coulée et plus de 40 mètres en se rapprochant du cratère.

Pour répondre à la question du géodésien, les coordonnées sont exprimées en ITRF2014 pour comparaison, tandis que les altitudes sont obtenues grâce à des hauteurs ellipsoïdales en ITRF2014 corrigées de l'ancien modèle EGM96 pour homogénéité avec les anciennes données.



Récepteur Trimble Alloy



Récepteur GNSS Trimble R10

© Geotopo

© Geotopo



© ENS



Luca met en place les films dans les dosimètres

Le radon et ses mystères !

Par Luca Terray, doctorant de l'Université Clermont Auvergne

A quoi ressemble l'intérieur d'un volcan ? Quelle est la forme de sa tuyauterie, et quels y sont les mouvements du magma et du gaz, qui jaillissent telles l'eau et les bulles d'une boisson pétillante trop vite ouverte ? En combien de temps les bulles de gaz sont-elles formées ? À quelle vitesse remontent-elles ? Comment faut-il tourner ces curseurs pour déclencher une éruption ? Voilà quelques questions qui peuplent les rêveries de volcanologue !

Pour pouvoir avancer dans ces questionnements, nous avons besoin d'observations auxquelles nous rattacher. Mais comment observer ce qui se passe en profondeur dans la plomberie du volcan, à une échelle fine (quelques mètres ou dizaines de mètres) que les techniques d'imagerie géophysique voient souvent très flou ? Nous n'avons d'autres choix que de traquer à la surface les répercussions des mouvements profonds qui animent le volcan. J'ai choisi pour ma part de m'intéresser aux gaz qui s'échappent en permanence de nombreux volcans, quand bien même il n'y a pas d'éruption, comme sur l'Etna. Ces gaz viennent juste de quitter le magma en profondeur et sont donc des messagers qui peuvent nous renseigner sur l'état du volcan, à condition de savoir les décrypter. Parmi la pléiade d'éléments et d'isotopes que comptent les gaz magmatiques, je recherche ceux

qui sont radioactifs : le radon (^{222}Rn) et ses descendants (^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po). Ces atomes sont si rares que nous devons filtrer le panache de gaz de l'Etna pendant plus d'une heure pour pouvoir les mesurer ! Nous utilisons pour cela des aspirateurs et des batteries que nous devons monter à dos d'homme jusqu'au sommet du volcan. Pour la mesure du radon lui-même qui est un gaz noble et ne se laisse pas piéger dans un filtre, nous avons installé pour quelques mois des dosimètres tout autour du cratère central de l'Etna : ce sont de simples films qui se font trous lorsqu'un atome de radon se désintègre dans leur voisinage, ainsi en comptant le nombre de trous à l'issue de la période d'exposition on peut en déduire la concentration moyenne du radon dans le panache de gaz. Mais pourquoi se donner tant de mal pour quelques atomes isolés ?

Parce ce qu'ils permettent de chronométrer le mouvement du magma et du gaz en profondeur ! En effet, ces atomes ont la propriété de rentrer dans les bulles de gaz quand celles-ci se forment (on dit qu'ils sont volatils) et puisqu'ils sont aussi radioactifs leur quantité dans les bulles de gaz diminue au cours du temps. En mesurant ce qu'il reste de ces atomes quand le gaz parvient à la surface, on peut alors estimer l'âge du gaz que le volcan est en train d'émettre. On apporte ainsi quelques éléments de réponse aux questions du début : nous avons trouvé que sur l'Etna les gaz mettent 4 à 5 jours pour remonter jusqu'à la surface ! ●



COMMANDEZ LE "LEXIQUE GNSS POUR LE POSITIONNEMENT" AU PRIX DE 10,00 €
21 x 29,7 cm, 32 pages
frais de port inclus (France)

M/Mme Nom : _____

Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal :

Ville : _____

Tél. :

Fax :

Courriel : _____

Date :

Signature

Bulletin de commande à retourner accompagné d'un chèque à l'Association française de topographie
73, avenue de Paris - 94165 SAINT-MANDÉ
Cedex - Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

Achat également sur Internet : www.aftopo.org

À quelles altitudes se trouvent les horloges atomiques de l'observatoire de Paris ?

■ Xavier COLLILIEUX - Pacôme DELVA - Laurent HEYDEL - Guillaume LION - Fabien BERGERAULT
Raphaëlle DELAUGERRE - Loïc EVRARD - Sylvain GONNET - Damien PESCE - Patrice PREZAT

L'exactitude des horloges optiques permet d'envisager dans le futur leur utilisation pour déterminer des différences d'altitudes à une précision centimétrique. Les développements actuels consistent à comparer les fréquences d'horloges en cours de développement. Ainsi, la mise en place de protocoles de comparaison constitue une première étape. Aujourd'hui, c'est encore au géomètre, au moyen des techniques traditionnelles, de déterminer l'altitude des horloges pour permettre ces comparaisons et fournir une mesure de référence. Cet article décrit les opérations de nivellement effectuées par l'IGN à l'Observatoire de Paris dans le contexte de projets scientifiques européens impliquant le laboratoire SYRTE de l'Observatoire de Paris.

MOTS-CLÉS

Métrologie – horloges atomiques – nivellement chronométrique – géodésie relativiste – nivellement

temps est mesuré par le nombre de cycles accumulés par ce phénomène. Historiquement, ce sont les cycles d'alternance jour/nuit qui étaient utilisés pour la mesure du temps, un jour étant subdivisé en 24 heures. Le phénomène à la base du fonctionnement des horloges atomiques est lié à une propriété des atomes.

Les électrons d'un atome ne peuvent atteindre qu'un nombre limité de niveaux d'énergie. Pour changer de niveau d'énergie, ils émettent ou absorbent une onde électromagnétique à une fréquence spécifique.

Depuis 1967, deux niveaux de la structure hyperfine du césium ont été promus étalon pour la définition de la seconde par la Conférence générale des poids et mesures. La fréquence associée à ces deux niveaux, 9 192 631 770 battements par seconde, a ainsi été décrétée et sa valeur est, par conséquent, exacte. Une horloge est donc liée à un élément spécifique, par exemple le césium 133 pour les horloges à césium. Pour mesurer cette fréquence, une onde électromagnétique de fréquence connue est émise en direction des atomes pour opérer la transition atomique, cette fréquence étant asservie par comptage du nombre d'atomes excités (Delva et Lodewyck, 2013). C'est en partie la hauteur de la fréquence du phénomène étudié qui assure une grande précision dans la mesure du temps.

L'exactitude relative d'une horloge atomique est exprimée à l'aide de la quantité $\Delta f/f$, où f est la fréquence de l'onde et Δf la précision à laquelle cette fréquence peut être maintenue. Ce moyen d'exprimer l'exactitude est plutôt commode. Si deux horloges ont des fréquences différant de Δf , la diffé-

L'unité mixte de recherche Système de référence temps espace (SYRTE), localisée à l'Observatoire de Paris, est chargée par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) de la responsabilité des références nationales de temps et de fréquence, et participe à l'établissement du Temps atomique international (TAI). À ce titre, elle mène des recherches en métrologie du temps et des fréquences qui débouchent sur le développement d'horloges atomiques extrêmement précises. Son expertise internationalement reconnue lui vaut d'être un acteur de premier plan dans deux projets récents du programme *European Metrology Research Program* (EURAMET) qui ont la particularité de nécessiter des campagnes de nivellement. Le premier projet "*International Timescales with Optical Clocks*" (ITOC)¹ s'est déroulé de 2013 à 2016. Son objectif était de comparer des horloges optiques conçues par des instituts de métrologie en Europe, visant ainsi à établir des standards et étudier des méthodes de comparaison dans des gammes de précision encore inégalées.

Sans en énumérer tous les partenaires, citons parmi les prestigieux laboratoires étrangers le *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB, Allemagne), le *National Physical Laboratory* (NPL, Grande-Bretagne) et le *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica* (INRIM).

Ce travail se poursuit aujourd'hui avec le projet "*Optical frequency transfer – a European network*" (OFTEN)² qui vise plus particulièrement à transférer le temps issu d'horloges optiques entre deux observatoires au moyen de fibres optiques. Comme l'énoncé du premier projet l'indique, un des enjeux majeurs est la redéfinition de la seconde à l'aide d'un nouveau standard. Nous allons voir ici en quoi le géomètre se trouve être un acteur indispensable à cette tâche.

Les horloges atomiques et leurs précisions

Une horloge est un instrument qui est basé sur l'étude d'un phénomène périodique. L'écoulement du

¹ Site Internet du projet ITOC : <http://projects.npl.co.uk/itoc/>

² Site Internet du projet OFTEN: https://www.ptb.de/emrp/often_home.html



rence de cycles comptabilisée au bout d'un temps t serait $\Delta f/f \cdot t$. Autrement dit, $\Delta f/f$ peut être interprété comme la dérive d'une horloge en seconde par seconde. L'exactitude relative $\Delta f/f$ des meilleures horloges à césium est aujourd'hui de l'ordre de quelques 10^{-16} (Guéna et al., 2017). Aujourd'hui, les horloges utilisant d'autres atomes les surclassent en exactitude.

La fréquence de ces horloges est si grande qu'elle correspond à une onde dans le domaine visible, on parle alors d'horloges optiques. Elles sont basées sur l'utilisation de laser pour émettre en direction des atomes. Elles présentent une exactitude relative de 10^{-17} à 10^{-18} (Lisdat et al., 2016 ; Huntemann et al., 2016). Les horloges les plus stables à ce jour atteignent une stabilité relative de l'ordre de 10^{-18} en cumulant seulement 30 minutes de mesures (Chou et al., 2010 ; Nicholson et al., 2015 ; Takano et al., 2016 ; Schioppo et al., 2016).

Fréquence de battement d'une horloge et différence d'altitudes

Comme exposé ci-dessus, la précision de la mesure de l'écoulement du temps est directement liée à la précision à laquelle la fréquence de l'onde émise en direction des atomes peut être maintenue. Mais il s'avère que l'intensité du champ de pesanteur influence la façon dont le temps s'écoule. Ce phénomène est prédit par la théorie de la relativité générale : la différence de fréquence entre deux horloges fixes sur Terre est liée à la valeur de la différence du potentiel de pesanteur entre les positions de chacune des horloges (Delva et Lodewyck, 2013 ; Delva et al. 2018). Cet effet est appelé de manière générale décalage relativiste des horloges. Il est composé d'une partie liée au champ gravitationnel (le décalage vers le rouge gravitationnel, ou effet Einstein), et une partie liée aux vitesses des deux horloges (par rapport aux étoiles lointaines). La différence de fréquence relative entre une horloge parfaite localisée au point A et une autre au point B, soumis respectivement aux potentiels de pesanteur W_A et W_B , est :

$$(f_B - f_A) / f_B = (W_B - W_A) / c^2 \quad (1)$$

avec c la vitesse de la lumière dans le vide. Cette équation est valable jusqu'à une précision de 10^{-19} , ce qui est suffisant au regard de la précision recherchée, voir la section "les horloges atomiques" ci-dessous. À noter que cet effet de décalage relativiste est l'objet de tests poussés utilisant les horloges atomiques du système de positionnement par satellites Galileo, ou encore l'horloge PHARAO, dans le cadre de la mission ACES, prévue pour être arriérée à la station spatiale internationale début 2020 (Delva et al., 2015a, Delva et al., 2015b, Meynadier et al., 2018).

Pour obtenir la différence théorique de fréquence entre deux horloges optiques d'exactitude relative de 10^{-18} localisées en deux points distincts, il faut donc connaître la différence de potentiel de pesanteur entre ces 2 points à environ $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Comme l'accélération de pesanteur est le gradient du potentiel de pesanteur, on déduit la relation suivante :

$$dW = -g \cdot dH \quad (2)$$

avec dW la variation du potentiel liée à une variation de hauteur dH . Le vecteur accélération de pesanteur dirigé vers le bas explique le signe négatif de cette relation. En prenant $g \approx 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, on déduit que la différence d'altitude entre deux horloges optiques doit être connue à 1 cm près. La relation ci-dessus étant linéaire, une horloge à césium 100 fois moins exacte nécessitera une correction de *redshift* relativiste (ou décalage vers le rouge) basée sur une différence d'altitude de précision métrique.

Inversement, la connaissance de la différence de fréquence entre 2 horloges ayant une précision relative de 10^{-18} permettrait de calculer la différence de potentiel et donc la différence d'altitude à une précision de 1 cm. En effet, pour mémoire, une altitude est par définition la différence entre un potentiel de référence W_0 et le potentiel de pesanteur au point divisé par un modèle d'accélération de pesanteur.

Ce phénomène de décalage vers le rouge relativiste est bien connu et est déjà exploité par le Bureau internatio-

nal des poids et mesures (BIPM) pour déterminer l'exactitude de l'échelle de temps atomique internationale (TAI) à partir d'environ une dizaine de fontaines atomiques situées à des altitudes différentes (BIPM, 2016 ; Arias et al., 2011). En réalité, chacune des fontaines atomiques utilisées pour le calcul du TAI mesure sa propre échelle de temps. Pour contribuer au TAI, les mesures d'une horloge doivent être corrigées du décalage vers le rouge relativiste : le temps d'une horloge contributrice (assimilable à un temps propre au sens de la relativité générale) est ainsi transformé au temps qu'aurait mesuré une horloge fictive localisée sur une équipotentielle du champ de pesanteur dont le potentiel W_0 est défini par convention. Cette équipotentielle est aujourd'hui confondue avec le géoïde à la précision des horloges près. La formule (1) peut donc être appliquée pour calculer le décalage de fréquence.

En conclusion, la connaissance du potentiel de pesanteur à l'emplacement des horloges (donc des altitudes) est requise :

- pour comparer des horloges (distantes ou proches). Dans ce cas, seule la différence de potentiel (donc d'altitude) doit être connue. Pour exemple, la relation (1) doit être utilisée pour comparer des horloges localisées à des altitudes différentes dans les locaux de l'Observatoire de Paris, voir *Table 1* ;
- pour convertir l'échelle de temps locale réalisée par l'horloge en une échelle de temps globale telle qu'elle serait observée sur le géoïde. Dans ce cas, c'est $W_0 - W$ la cote géopotentielle qu'il faudra connaître. La meilleure précision pour le calcul de W est obtenue par combinaison de modèles gravimétriques (quasi-géoïde) et de mesures de hauteurs ellipsoïdales par GNSS (Denker et al., 2017). D'où l'intérêt de niveler les antennes GNSS permanentes proches des horloges pour fournir une hauteur ellipsoïdale aux horloges.

Retenons donc pour la suite que la différence d'altitude entre horloges doit être connue à mieux que 1 cm, soit $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.



Les horloges atomiques

Le SYRTE héberge une grande variété d'horloges atomiques dans différents locaux du parc, citons notamment (SYRTE, 2018) :

- des horloges à césium et rubidium et en particulier des horloges destinées à des applications industrielles et spatiales ;
- une horloge optique basée sur l'atome de mercure ;
- deux horloges optiques basées sur l'atome de strontium affichant une exactitude de 4.10^{-17} (Lisdar et al 2016 (Table 1)).

Par ailleurs, au printemps 2017, l'horloge optique transportable du PTB d'exactitude 7.10^{-17} (Koller et al., 2017), hébergée dans une remorque, a été stationnée dans le parc de l'Observatoire de Paris. Reliée par fibre optique à une autre horloge, elle permet la comparaison de fréquences mesurées en des endroits non accessibles par des horloges fixes.

Campagne de mesures

L'objectif des campagnes de mesures effectuées à l'Observatoire de Paris était de déterminer les altitudes des différentes horloges. Les stations GNSS permanentes nommées OPMT et OMPX ont également été nivelées. La station OPMT appartient au réseau GNSS du service International GNSS (IGS) et au réseau GNSS permanent français

(RGP) ; ses coordonnées sont donc connues dans le référentiel international ITRF2014 ou européen ETRF2000. Deux repères de nivellement (RN) du réseau NGF/IGN69, référentiel d'altitude légal français, sont présents dans l'enceinte de l'Observatoire de Paris. Ils sont présentés en *figure 1* et serviront de référence pour les altitudes calculées.

En 2013, la première campagne a été l'occasion d'installer un réseau de repères comprenant des points :

- dans le parc de l'Observatoire, c'est-à-dire à l'extérieur des laboratoires. Un point de référence central proche des bâtiments d'intérêt a notamment été matérialisé ;
- sur les toits de deux bâtiments ;
- à l'intérieur des bâtiments abritant les horloges ou gravimètres. Des rivets ont été scellés dans les murs à proximité des tables des horloges pour servir de points auxiliaires.

Les coordonnées horizontales des points situés en extérieur ont été déterminées par GNSS dans le référentiel RGF93 et leurs altitudes obtenues par combinaison de nivellement direct et indirect. Le nivellement direct a été effectué sur la base d'un cheminement en aller-retour entre les 2 repères de nivellement du réseau NGF/IGN69 de la *figure 1*. Ce cheminement a permis de montrer la stabilité relative de ces 2 repères puisque la différence entre la dénivellation théorique calculée à partir des altitudes publiées et celle mesurée est de 1 mm.

Les tables des horloges, ainsi que les repères auxiliaires ont pu être nivelés à l'aide d'une mire de taille réduite (avec ruban INSAR), comme illustré sur la *figure 2*. Le nivellement indirect a été utilisé pour déterminer les altitudes des points situés sur les toits par visées zénithales réciproques et simultanées afin de s'affranchir de la réfraction atmosphérique. Des stations totales Leica TCA2003 et TDA5005 ont été utilisées à cette fin. L'ensemble des données de nivellement a été compensé par moindres carrés en prenant comme référence les altitudes des deux RN présents dans le parc. Les demi-intervalles de confiance à 95 % des altitudes déterminées (précision à

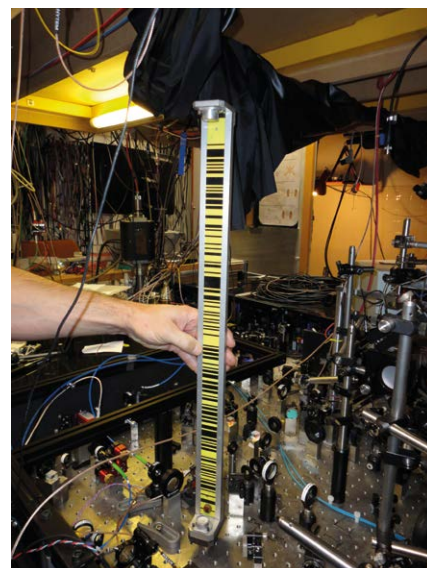


Figure 2. Nivellement d'une table d'horloge, campagne de 2013.



Figure 1. Repères de nivellement disponibles dans le parc de l'Observatoire de Paris. Ils portent les matricules P.A.A3B3-41 et P.A.A3B3-42.



Description	Campagne	dH (m)	dW associé. (m ² .s ⁻²)	Différence de fréquence relative
FO2 (bat B) - FO1 (bat Foucault)	2013	-3.44	33.78	3.8 10 ⁻¹⁶
FO1 (bat Foucault) -SR1 (sous-sol Foucault)	2013	6.87	-67.39	-7.5 10 ⁻¹⁶
FO1 (bat Foucault) – PT1 (PTB)	2017	-0.73	7.12	7.9 10 ⁻¹⁷

Table 1. Différence d'altitude entre certains points de référence à proximité des horloges, différence de potentiel et différence de fréquence relative des horloges

2 sigma) s'échelonnent de 0.6 mm à 1.0 mm.

En 2017, ce réseau a été réutilisé pour déterminer l'altitude de l'horloge optique transportable du PTB stationnée dans le parc de l'Observatoire de Paris. Celle-ci se trouvait dans une remorque à proximité du bâtiment Foucault. Une campagne de mesure a été effectuée à l'installation, début mai 2017, puis une autre fin juin 2017 avant le démontage afin de contrôler la stabilité de l'équipement. Un écart inférieur à 0.5 mm a été reporté entre les deux campagnes. Les points qui ont été nivelés sont situés sur la remorque, sur le marbre supportant l'horloge, et de part et d'autre d'une chambre à vide sphérique dont le centre est le point de référence de l'horloge, voir figure 3. Un nouveau cheminement en aller-retour entre les 2 repères de la figure 1 et le point de référence central implanté en 2013 a été effectué validant la stabilité du site, les différences d'altitudes obtenues étant inférieures à 0.3 mm.

Exploitation des mesures

La table 1 présente les différences d'altitudes déterminées pour des points de référence proches des trois horloges (les points utilisés ici sont situés sur les marbres). A titre d'illustration, les différences relatives théoriques de fréquences associées à ces différences d'altitudes sont fournies et calculées à l'aide des équations (1) et (2) comme :

$$(f_B - f_A) / f_B = -g_{\text{moy}} (H_B - H_A) / c^2 \quad (3)$$

Une valeur de $g_{\text{moy}} = 9.809 \text{ m.s}^{-2}$ a été adoptée pour la conversion. Elle correspond aux trois premières décimales de la valeur de gravité du point OBSP situé à l'Observatoire (source BGI, <http://bgi.obs-mip.fr>). Cette valeur unique et cette

précision suffisent pour obtenir une incertitude sur la fréquence relative de 2.10^{-18} pour des dénivelées inférieures à 100 m. On note que la différence de fréquence relative calculée (dernière colonne) est du même ordre de grandeur ou supérieure à la précision des meilleures horloges du SYRTE.

Les valeurs d'altitudes dérivées des campagnes de mesures décrites ici, ainsi que celles obtenues sur 3 sites en Allemagne équipés d'horloges atomiques, ont été étudiées pour calculer la différence du potentiel de pesanteur entre les sites allemand et français (Denker et al., 2017). L'étude visait à comparer 2 méthodes de calcul du potentiel de pesanteur à l'emplacement des horloges. La première méthode discutée est basée sur une

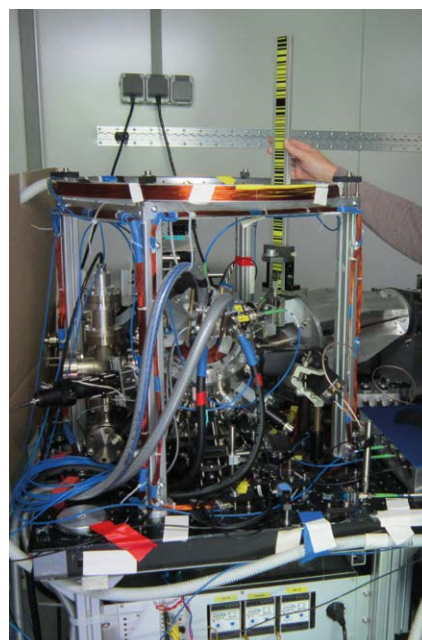


Figure 3. Nivellement du sommet d'un disque juxtaposant la chambre à vide de l'horloge transportable (Koller, 2017). *Courtesy of Physikalisch-Technische Bundesanstalt*

conversion directe des altitudes en potentiel. Mais comme l'altitude est ici fournie en NGF/IGN69 qui diffère du système d'altitude allemand, une correction supplémentaire s'avère nécessaire en amont. La seconde méthode est basée sur l'utilisation de la hauteur ellipsoïdale obtenue par GNSS (dérivée de la hauteur de la station OPMT et des données de nivellement) et d'un modèle de quasi-géoïde régional. La première méthode est recommandée par les auteurs pour des distances inférieures à 100 km et la seconde pour les distances supérieures pour s'affranchir de l'accumulation des erreurs dans les réseaux de nivellement classiques.

Horloges et nivellement chronométrique

Le nivellement à l'aide d'horloges atomiques est appelé nivellement chronométrique (Bjerhammar 1975 ; Vermeer 1983 ; Bjerhammar 1985). Une démonstration expérimentale de ce concept a été effectuée pour la première fois en 2010 (Chou et al., 2010). Le déplacement vertical entre deux horloges atomiques optiques d'une trentaine de centimètres a pu être détecté dans la différence de fréquence mesurée. Plus récemment, une mesure de nivellement d'une précision de 5 cm entre 2 points séparés de 15 km a été effectuée par horloges atomiques reliées par fibre optique (Takano et al., 2016). Une distance plus importante a été franchie avec la comparaison des horloges du PTB à Braunschweig et de l'Observatoire de Paris reliées par fibre optique sur une distance de 1 415 km (Denker et al., 2017 ; Lisdat et al., 2016).

Aujourd'hui, un programme de recherche entre le SYRTE et l'IGN vise à étudier l'apport des horloges atomiques pour la détermination à haute résolution du géoïde, c'est-à-dire à des échelles spatiales de 10 km sur la base de simulations numériques (Lion et al., 2017). Ceci en attendant demain les premières horloges atomiques destinées au nivellement, mais il faudra pour cela résoudre le problème de la transmission à distance de la fréquence entre deux horloges pour des applications



opérationnelles. Un premier pas sera franchi avec la mission ACES/PHARAO qui reposera sur la mise en orbite d'une horloge à atomes froids sur la station ISS pour du transfert de temps avec une stabilité inégalée inférieure à la picoseconde après un passage de l'ISS de l'ordre de 300 s (Meynadier et al., 2018). Une synchronisation meilleure encore à hauteur de 10^{-18} pourrait être obtenue par l'utilisation de signaux laser transmis à une constellation de satellites, comme celle de futurs GNSS (Wolf, 2016) mais aujourd'hui, seule la fibre optique permet d'atteindre cette précision. ●

Remerciements

Un grand merci à Jérôme Lodewyck, Rodolphe Le Targat, Paul-Eric Pottie, Eva Bookjans du SYRTE ainsi qu'aux partenaires du Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

Contacts

Xavier COLLILIEUX

enseignant-chercheur IGN, ENSG, Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité
xavier.collilieux@ensg.eu

Pacome DELVA

maître de conférences SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, LNE – pacome.delva@obspm.fr

Laurent HEYDEL

chef des Travaux spéciaux IGN, Service de géodésie et nivellement
travaux.speciaux@ign.fr

Guillaume LION

chargé de recherche IGN, ENSG, Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité
guillaume.lion@ign.fr

Fabien BERGERAULT,

Raphaëlle DELAUGERRE, Loïc EVRARD,

Sylvain GONNET, Damien PESCE,

Patrice PREZAT

géomètres au Service de géodésie et nivellement de l'IGN
travaux.speciaux@ign.fr

Références

Arias E. F., G. Panfilo, and G. Petit (2011) *Timescales at the BIPM*, *Metrologia*, vol. 48, no. 4, p. S145

Bjerhammar A. (1975) *Discrete approaches to the solution of the boundary value problem in physical geodesy*, *Bolletino di geodesia e scienze affini*, no. 2, pp. 185-241

Bjerhammar A. (1985) *On a relativistic geodesy*, *Bull. Geodesique*, vol. 59, no. 3, pp. 207-220

BIPM (2016) *BIPM Annual Report on Time Activities* (2016)

Chou CW, Hume DB, Rosenband T, Wineland DJ (2010) *Optical clocks and relativity*. *Science* 329(5999):1630-1633, doi:10.1126/science.1192720

Delva, P., H. Denker, and G. Lion (2018) *Chronometric geodesy: methods and applications*, arXiv:1804.09506 [gr-qc]

Delva, P., F. Meynadier, P. Wolf, C. Guerlin, (2015a), *La gravitation vue par les horloges atomiques*, Hors-série "La Recherche" N° 6 :57-60

Delva P., A. Hees, S. Bertone, E. Richard, and P. Wolf (2015b) *Test of the gravitational redshift with stable clocks in eccentric orbits: application to Galileo satellites 5 and 6*, *Class. Quantum Grav.*, vol. 32, no. 23, p. 232003, doi:10.1088/0264-9381/32/23/232003

Delva P., J. Lodewyck (2013) *Atomic clocks: new prospects in metrology and geodesy*, *Acta Futura*, vol. 07, pp. 67-78

Denker et al., Timmen, L., Voigt, C. et al. (2017) *Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10^{-18} in the context of international timescales: a review and practical results*, *Journal of geodesy*, doi: 10.1007/s00190-017-1075-1

Hinkley, N. et al. (2013) *An atomic clock with 10^{-18} instability*. *Science*, 341(6151), 1215-1218, doi:10.1126/science.1240420

Koller, S. B., Grotti, J., Al-Masoudi, A., Dörscher, S., Häfner, S., Sterr, U., et Lisdat, C. (2017) *Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty*. *Physical Review Letters*, 118(7), 073601, doi:10.1103/PhysRevLett.118.073601

Guéna, J. et al. (2017) *First international comparison of fountain primary frequency standards via a long distance optical fiber link*, *Metrologia*, vol. 54, no. 3, p. 348

N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, C. Tamm, and E. Peik (2016) *Single-Ion Atomic Clock with 3×10^{-18} Systematic Uncertainty*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, no. 6, p. 063001, doi: 10.1103/PhysRevLett.116.063001

Lion, G., I. Panet, P. Wolf, C. Guerlin, S. Bize and P. Delva (2017) *Determination of a high spatial resolution geopotential model using atomic clocks comparisons*, *Journal of Geodesy*, doi:10.1007/s00190-016-0986-6

Lisdat, C. et al. (2016) *A clock network for geodesy and fundamental science*, *Nature communications* 7 (2016):12443, doi:10.1038/ncomms12443

Meynadier F., P. Delva, C. le Poncin-Lafitte, C. Guerlin, and P. Wolf (2018) *Atomic clock ensemble in space (ACES) data analysis*, *Class. Quantum Grav.*, vol. 35, no. 3, p. 035018, doi:10.1088/1361-6382/aaa279

Morfolou M., P. Delva, (2016) *Introduction à la géodésie chronométrique*, Les Cahiers Clairaut, 156

Nicholson, T. L. et al. (2015) *Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty*. *Nat. Commun.* 6, 6896

Schioppo M. et al. (2016) *Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles*, *Nat Photon*, vol. 11, no. 1, pp. 48-52, doi:10.1038/nphoton.2016.231

SYRTE (2018) *Site Internet du SYRTE*, URL : <https://syрте.obspm.fr/>, consulté en Janvier 2018

Takano T et al. (2016) *Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks*. *Nat Photon* 10(10):662-666, doi:10.1038/nphoton.2016.159

Vermeer M. (1983) *Chronometric levelling*, Finnish Geodetic Institute, Helsinki

Wolf P. (2016) *Viewpoint: Next Generation Clock Networks*, *Physics* 9, 51

ABSTRACT

The accuracy of atomic clocks is becoming large enough to determine altitude differences at the centimeter level in the near future. Current research activities consist in developing and comparing clock frequencies, and in setting up time transfer techniques with the required precision. Today, surveyor still has to provide clock altitude differences by traditional methods to allow these comparisons. This article reports levelling carried out by IGN at Paris Observatory for two European scientific projects in which the SYRTE Laboratory is involved.

La journée mondiale de l'hydrographie 2018 : l'hydrographie au service du développement durable

■ Gilles BESSERO

La journée mondiale de l'hydrographie, célébrée chaque année le 21 juin, n'est probablement pas la plus connue des journées mondiales inscrites au calendrier international. Bien qu'elle ait été endossée par l'Assemblée générale des Nations Unies en 2005, sa coïncidence avec le premier jour de l'été dans l'hémisphère nord et avec la Fête de la musique ne facilite pas sa mise en lumière ! Il faut aussi reconnaître que l'hydrographie, n'est pas non plus l'activité maritime la plus notoire et pourtant sans elle, les navigateurs et les autres usagers de la mer seraient bien en peine d'exercer leurs métiers. Avec le Programme de développement durable à l'horizon 2030 adopté par l'Organisation des Nations Unies en 2015, elle prend une ampleur accrue en tant qu'ingrédient clé du développement durable des océans. Le thème retenu par l'Organisation hydrographique internationale pour la journée mondiale de l'hydrographie de 2018 : "La bathymétrie – un pilier pour des mers, océans et voies navigables durables" vise à mieux mettre en évidence le rôle que joue l'hydrographie en la matière. Cet article rappelle en quoi consiste l'hydrographie et explicite les défis à relever.

Hydrographie : de quoi s'agit-il ?

Le terme "hydrographie" est en lui-même source de confusion car il a deux acceptions différentes : il désigne d'une part la branche de la géographie ayant pour objet l'étude et la description des mers, des lacs et des cours d'eau présents à la surface du globe et d'autre part l'ensemble des nappes et cours d'eau répartis à la surface d'un pays, d'une région. C'est ici de la première acception dont nous parlons, la détermination de la topographie des fonds marins, correspondant à "cet étrange métier de mesureur du fond des mers" que la navigatrice Isabelle Autissier imagine derrière les cartes marines [Autissier I., 2013]. La carte marine est en effet le premier produit de l'hydrographie qui vise à "mesurer et décrire les éléments physiques des océans, des mers, des zones côtières, des lacs et des fleuves, (...) d'abord pour les

■ MOTS-CLÉS

Hydrographie, carte marine, infrastructure de données spatiales, développement durable, relations internationales

besoins de la sécurité de la navigation mais aussi à l'appui de toutes les autres activités maritimes, incluant le développement économique, la sécurité et la défense, la recherche scientifique et la protection de l'environnement" [OHI, 2014]. L'hydrographie fournit en effet le support de pratiquement tout ce qui se passe sur, dans, ou sous la mer : sans

hydrographie, pas de navigation maritime, pas d'aménagement portuaire, pas d'installation d'infrastructures en mer, pas de programme de protection de l'environnement marin, pas de gestion de la zone côtière, pas de sauvetage en mer, pas de délimitation de frontières maritimes ! L'importance du sujet justifie que l'Assemblée générale des Nations Unies ait endossé en 2005 l'adoption d'une journée mondiale de l'hydrographie célébrée depuis 2006 le 21 juin de chaque année.

Les techniques mises en œuvre

L'hydrographie se décline en trois volets faisant chacun appel aux techniques les plus modernes :

- le recueil de données "géoréférencées" (c'est-à-dire dont on détermine précisément la position à la surface de la Terre) ;
- le traitement des informations recueillies et leur intégration dans des bases de données ;
- la production, la diffusion et la mise à jour de produits ou services répondant aux besoins des différents usagers.



Figure 1. Levé hydrographique à bord d'une embarcation



Figure 2. Un navire hydrographique : le Beautemps-Beaupré (France)



Le recueil des données, mesurer la mer, est effectué principalement à partir d'embarcations dans les petits fonds (Figure 1) ou de navires (Figure 2) lorsque la profondeur est suffisante. L'utilisation de moyens aéroportés, voire de satellites, est possible dans certaines conditions. Les progrès de l'automatisation permettent le recours à des engins télé-

opérés ou autonomes, drones de surface ou sous-marins qui offrent la possibilité de démultiplier les capacités du navire porteur (et accessoirement de réaliser des mesures en toute discrétion).

Le problème de la localisation en mer fut longtemps une difficulté (Figure 3). Elle a reposé jusqu'au milieu des années 1950 exclusivement sur des moyens optiques, demandant la mise en place de repères à terre ; hors de vue de côte les seuls repères étaient les astres ou les étoiles, sous réserve que le ciel soit dégagé et la précision était médiocre (2 à 4 km). Le problème est maintenant résolu en tous lieux et en tout temps par les systèmes de navigation par satellites : GPS, Glonass, Galileo, etc. Ces systèmes donnent communément accès, en mer comme à terre, à une précision métrique et des modes de traitement un peu plus élaborés donnent une précision centimétrique.

La détermination des profondeurs, la bathymétrie, a elle aussi fait des progrès considérables (Figure 4). Jusqu'au début du 20^e siècle, le seul moyen connu était la mesure directe avec le plomb de sonde, dont la base était enduite de suif pour remonter un échantillon du fond. Il a fallu les progrès de l'acoustique sous-marine pendant la première guerre mondiale pour que puisse être développé le sondeur acoustique vertical, mesurant le temps de propagation d'un signal acoustique qui se réfléchit sur le fond. Cette méthode s'est généralisée après la seconde guerre mondiale. Un nouveau saut technologique au début des années 1970 a permis de décupler les performances en passant au sondeur multifaisceau qui mesure simultanément la profondeur selon un éventail perpendiculaire à la route du navire, le long d'une bande de largeur pouvant atteindre 5 à 10 fois la profondeur. Les sondeurs acoustiques sont mis en œuvre par des navires dont la vitesse est de l'ordre de 10 à 15 nœuds – 20 à 30 km/h. Leur mise en œuvre est délicate dans les zones de petits fonds qui sont par définition dangereuses pour la navigation. L'utilisation du laser aéroporté développé à partir de la fin des années 1970 permet de s'affranchir de cette contrainte. La vitesse est 10 à 15 fois supérieure à celle d'un navire mais la portée est limitée du fait de la faible transparence de l'eau au rayonnement électromagnétique et n'atteint ou dépasse la trentaine de mètres que dans des eaux très claires. La télédétection par satellite, qui a débuté avec le premier satellite "cartographique" Landsat en 1972, permet des mesures indirectes selon deux techniques principales. La première technique est passive. Elle est basée sur la mesure par un radiomètre embarqué du rayonnement émis par la surface de la Terre qui permet dans les conditions favorables de transparence de l'eau d'estimer la profondeur jusqu'à une trentaine de mètres avec une résolution horizontale de l'ordre du mètre. Une autre technique est basée sur un capteur actif, un radar dit "altimétrique", utilisé pour la première fois avec le satellite Seasat lancé en 1978. Le radar embarqué sur satellite mesure la topographie de la

Mesurer la mer :

Position : du sextant et du cercle hydrographique au GPS

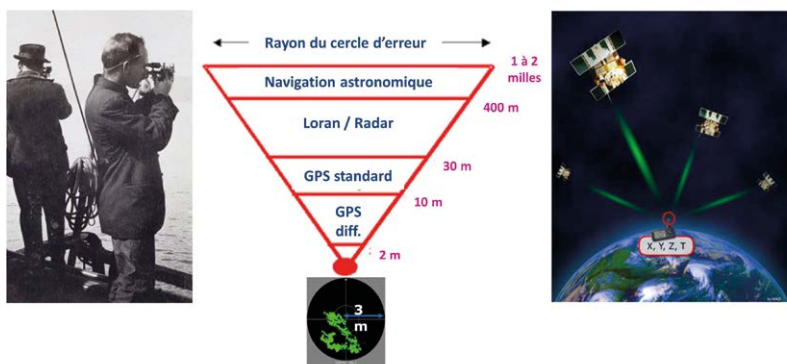
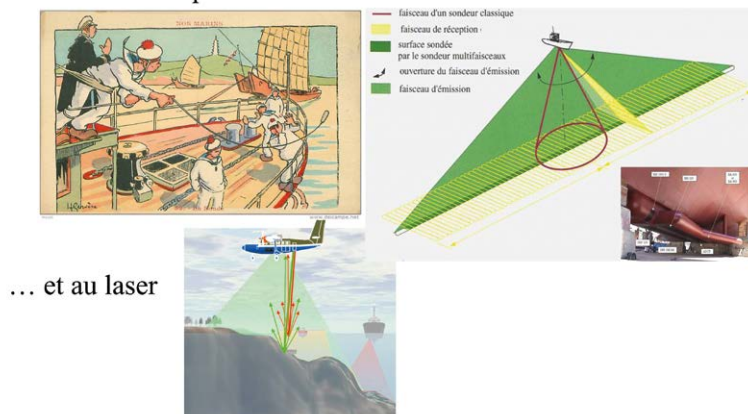


Figure 3. Mesurer la mer : position : du sextant et du cercle hydrographique au GPS

Mesurer la mer :

Profondeur : du plomb de sonde au sondeur multifaisceau ...



... et au laser

Figure 4. Mesurer la mer : profondeur : du plomb de sonde au sondeur multifaisceau et au laser



surface de la mer et permet de détecter les variations du champ de pesanteur induites par les reliefs sous-marins ; la difficulté est que ces anomalies peuvent aussi être causées par des variations de densité du sous-sol ; par ailleurs seules les grandes formes du relief ayant une envergure d'au moins 10 à 15 km sont détectées.

Le traitement des informations recueillies comprend une phase de validation et de mise en forme puis l'intégration des données validées dans des bases de données géographiques organisées et tenues à jour (systèmes d'informations géographiques). La phase de validation nécessite une attention particulière, afin de ne pas confondre bruit de mesure et anomalies induites par des hauts fonds ou des obstacles posés sur le fond. Dans le doute, il faut investiguer les anomalies par des moyens complémentaires (sondeur latéral, voire plongeurs).

Les produits de l'hydrographie

C'est à partir des bases de données intégrant l'ensemble des informations validées que les services hydrographiques élaborent, diffusent et mettent à jour les produits et services adaptés aux besoins des différentes catégories d'utilisateurs, notamment les cartes marines et les ouvrages nautiques qui les complètent (instructions nautiques, annuaires de marée, etc.). Le produit le plus connu est la carte marine. Les cartes étaient traditionnellement imprimées sur papier, mais elles sont aujourd'hui également publiées de plus en plus sous la forme de cartes électroniques numériques.

La production de cartes est de moins en moins le fondement de l'activité des services hydrographiques. Elle se voit reléguée au second plan par la maintenance, la gestion et la mise en œuvre des infrastructures de données spatiales nationales dont les cartes marines sont un produit dérivé parmi d'autres. Ces infrastructures sont associées à des services en ligne permettant aux utilisateurs de sélectionner et d'extraire les informations dont ils ont besoin (*voir par exemple data.shom.fr*).

L'hydrographie, une nécessité reconnue par le droit international

L'hydrographie est reconnue comme une nécessité par le droit international. Cette exigence se décline en obligation d'emport à bord des navires de moyens de navigation normalisés, dont les cartes marines nécessaires à la traversée prévue, et en obligation de fourniture par les États côtiers de "services hydrographiques" coordonnés pour les espaces maritimes dont ils ont la responsabilité. Ces obligations résultent de deux conventions internationales : la convention des Nations Unies sur le droit de la mer [Nations Unies, 1994] et la convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer, dite convention SOLAS (*Safety Of Life At Sea*) [Organisation maritime internationale, 2014].

Il résulte de ces deux textes que les États contractants doivent veiller à ce que :

- les levés hydrographiques soient exécutés ;
- les cartes marines et autres publications nautiques soient disponibles et à jour ;
- les renseignements sur la sécurité maritime soient diffusés.

Il s'agit d'obligations relevant du droit des traités qui concernent tous les gouvernements contractants.

Depuis 1998, elles sont rappelées annuellement par les résolutions successives de l'Assemblée générale des Nations Unies sur les océans et le droit de la mer.

Une organisation internationale spécialisée

Les travaux des agences hydrographiques nationales sont coordonnés au niveau international par une organisation spécialisée, l'Organisation hydrographique internationale, l'OHI (*Figure 5*), organisation intergouvernementale à caractère consultatif et technique qui a succédé en 1970 au Bureau

hydrographique international (BHI) établi en 1921 à Monaco. La journée mondiale de l'hydrographie célèbre l'anniversaire de la création du BHI, le 21 juin 1921. L'objectif de l'OHI est d'assurer que toutes les mers, tous les océans et toutes les voies navigables du monde soient convenablement hydrographiés et cartographiés.

La production de l'OHI se décline en quatre composantes principales. En tant qu'organisation de normalisation, elle publie des normes, des guides et des publications connexes, qui sont pratiquement tous accessibles gratuitement sur le site internet de l'OHI (www.iho.int). Les normes portent notamment sur les levés hydrographiques, les spécifications des cartes marines, le codage et la visualisation des cartes électroniques, la formation des hydrographes et des spécialistes en cartographie marine. Les guides traitent de sujets comme la mise en place d'infrastructures de données géospatiales marines ou les aspects techniques des délimitations maritimes. Parmi les autres publications, citons le manuel sur l'hydrographie ou le répertoire des résolutions de l'OHI.

L'OHI assure, pour le compte de l'Organisation maritime internationale et en liaison avec l'Organisation météorologique mondiale, la coordination technique du service mondial d'avertissements de navigation.

Par l'intermédiaire de ses commissions régionales, l'OHI fixe et met en œuvre les schémas cartographiques régionaux couvrant les différents bassins maritimes.

Enfin l'OHI mène un programme de renforcement des capacités dont l'objectif à long terme est que tous les États qui possèdent des eaux navigables disposent des voies et moyens de s'acquitter de leurs obligations en matière d'hydrographie.

L'hydrographie et les objectifs de développement durable

En septembre 2015, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté le Programme de développement durable à l'horizon 2030 [Nations Unies, 2015]. Ce programme cible en particulier



Figure 5. Logo de l'OHI



la viabilité des océans dans le cadre de son objectif de développement durable 14 – Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable. La cible 14 a de cet objectif comprend la nécessité d’approfondir les connaissances scientifiques dont l’un des enjeux majeurs mais méconnu est l’amélioration de la connaissance de la bathymétrie des océans.

Alors que les terres émergées sont aujourd’hui parfaitement cartographiées, il résulte de l’opacité du milieu liquide à la lumière et aux rayonnements électromagnétiques que moins de 10 % du fond des mers ont fait l’objet de levés hydrographiques systématiques et nous disposons de bien meilleures cartes de la Lune et de Mars que du fond des mers ! Force est de constater que la situation ne s’est guère améliorée au cours des vingt dernières années, malgré le développement de nouvelles technologies rappelé plus haut, du fait de la réduction du nombre de navires hydrographiques. Pourtant, les besoins ne cessent de croître avec par exemple :

- la croissance continue du trafic maritime mettant en œuvre des navires toujours plus gros : les tirants d’eau qui étaient de 2-3 m au début du 20^e siècle dépassent aujourd’hui 20 m pour les plus grands navires ;
- le développement des croisières dans des zones jusqu’ici peu fréquentées (îles exotiques, régions polaires) ;
- le développement de la “e-navigation” qui cherche en particulier à optimiser les routes des navires et plus généralement à tirer pleinement profit de l’automatisation et de l’ère du tout-numérique (Figure 6) ;
- la gestion dite “intégrée” de la zone côtière qui repose sur une infrastruc-



Figure 6. Passerelle d’un navire à l’ère du numérique



Figure 7. Dommages subis par le sous-marin USS San Francisco

ture de données géospaciales à haute résolution.

L’état des lieux est détaillé dans la publication de l’OHI sur l’état des levés hydrographiques et de la cartographie marine dans le monde [OHI, 2016]. Dans les eaux côtières, jusqu’à 200 m de profondeur, la proportion de zones pas ou mal hydrographiées dépasse 95 % dans les États insulaires du Pacifique sud-ouest et dans les régions polaires. Elle dépasse 80 % aux Caraïbes ou en Afrique de l’ouest. Elle atteint 65 % (45 % pas hydrographié, 20 % mal hydrographié) en Australie, 50 % au Royaume-Uni.

La première conséquence de cette situation concerne la sécurité de la navigation. La découverte de hauts fonds dangereux pour la navigation n’est pas rare. Les échouements sont la troisième cause d’accident des navires de commerce (après les avaries mécaniques et les collisions). Si la cause première réside principalement dans ce qu’il est convenu d’appeler le “facteur humain”, la méconnaissance des fonds est un facteur d’accident lorsqu’on sort des “sentiers battus”, comme le rappellent par exemple :

- le naufrage du paquebot Antilles au nord de l’île Moustique sur un récif inconnu en 1971 ;
- la collision du sous-marin nucléaire d’attaque USS San Francisco avec un mont sous-marin dans le Pacifique sud en 2006 (Figure 7) ;
- l’échouement du navire de croisière Nordkap en Antarctique en 2007 ;

- l’échouement du vraquier Gülser Ana en 2009 puis du vraquier New Mykonos en 2016 sur des hauts fonds non cartographiés au sud de Madagascar.

La prévention des risques naturels, qu’ils soient progressifs, comme l’érosion qui affecte certains rivages, ou catastrophiques, comme les ondes de tempête ou les tsunamis, passe aussi par une meilleure connaissance de l’hydrographie. Le tsunami en océan Indien de décembre 2004 a ainsi démontré la nécessité d’une connaissance fine de la bathymétrie pour prédire avec suffisamment de précision les zones susceptibles d’être touchées par l’onde océanique engendrée par un séisme ou une éruption volcanique sous-marine et déclencher l’alerte à bon escient. C’est tout simplement une question de vie ou de mort pour reprendre le titre d’un article sur le sujet [Parker B., 2013] ! Cela est d’autant plus important que dans certaines configurations (Méditerranée occidentale par exemple), le délai entre le séisme et l’arrivée du tsunami à la côte peut se chiffrer en quelques dizaines de minutes seulement [Roudil P. et al, 2013].

La capacité de lutter contre les pollutions accidentelles, qu’elles résultent d’un naufrage, d’une collision de navires ou d’un incident d’exploitation de plate-forme pétrolière est également conditionnée par l’état de la connaissance de l’hydrographie. Ainsi, les modèles de dérive des nappes d’hydrocarbures utilisés pour prévoir la



trajectoire de ces nappes et positionner les moyens de protection supposent une connaissance précise de la bathymétrie. La connaissance précise de la bathymétrie est aussi nécessaire pour toutes les applications et études s'appuyant sur la modélisation de la circulation océanique, qu'il s'agisse d'étudier le changement climatique, l'évolution des calottes polaires, la circulation des éléments nutritifs, des sédiments ou des pollutions d'origine terrestre, de surveiller les écosystèmes marins ou de développer les énergies marines renouvelables.

Les enjeux du développement durable des océans et de leurs ressources donnent un nouvel élan à la coopération internationale en matière d'hydrographie et la cartographie "complète" des océans est l'une des actions prévues au titre de la décennie des Nations Unies pour les sciences océaniques au service du développement durable 2021-2030, dont le principe a été adopté par l'Assemblée générale des Nations Unies lors de sa 72^e session le 5 décembre 2017 [Nations Unies, 2018]. Cette action sera menée dans le cadre du programme de la Carte générale bathymétrique des océans (GEBCO) co-piloté par l'OHI et la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (COI).

Elle fait l'objet d'un programme spécifique, "Seabed 2030", élaboré suite à un forum sur la future cartographie du plancher océanique tenu à Monaco en juin 2016. Ce projet, qui bénéficie d'un soutien financier important de la "Nippon Foundation" du Japon, vise à atteindre une résolution horizontale de l'ordre de 100 m. Il pourra notamment s'appuyer sur des démonstrateurs technologiques en cours de développement et d'évaluation dans le cadre du "Shell Ocean Discovery XPRIZE" doté de 7 millions USD, une compétition mondiale s'étendant sur trois ans (2016-2019) qui oppose plusieurs équipes dans le but de faire avancer les technologies de cartographie rapide, sans pilote et haute résolution des océans. L'atteinte de l'objectif du projet Seabed 2030 passe aussi par :

- le "déverrouillage" de l'accès aux données qui existent déjà mais dorment dans des armoires et ne sont pas mises à disposition ;

- la promotion et l'encouragement des initiatives innovantes de collecte et de maximisation des données, comme la bathymétrie participative (données géographiques fournies spontanément par les navigateurs) et la bathymétrie par satellite, afin de déterminer les zones à hydrographier complètement en priorité ;
- l'exécution de levés complets dans les zones prioritaires ainsi identifiées, en adaptant les spécifications aux enjeux économiques, environnementaux ou de sécurité.

L'hydrographie est la clé pour des mers bien gérées. Elle fait partie des voies et moyens pour atteindre les objectifs du Programme de développement durable à l'horizon 2030. La coopération internationale, ainsi qu'entre les acteurs de tous les secteurs y compris le secteur privé, est plus que jamais indispensable pour y parvenir. ●

Contact

Gilles BESSERO

Ancien directeur de l'Organisation hydrographique internationale
Membre de l'Académie de marine
gilles.bessero@orange.fr

Références

- Autissier Isabelle. *Chroniques au long cours*. Paris : Flammarion, 2013
- Organisation hydrographique internationale. *Hydrographie. Dictionnaire hydrographique* - version WIKI en ligne "Anglais/Français". 2014. Disponible sur : <http://hd.iho.int/fr/index.php/Hydrographie> (Consulté le 21/03/2018)
- Nations Unies. *Convention des Nations Unies sur le droit de la mer* (avec annexes, acte final et procès-verbaux de rectification de l'acte final en date des 3 mars 1986 et 26 juillet 1993). Conclue à Montego Bay le 10 décembre 1982. In : Recueil des traités. Nations Unies, 1994. Vol. 1834, I-31363
- Organisation maritime internationale. *SOLAS*, Edition française consolidée. OMI, 2014.
- Nations Unies. *70/1. Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 25 septembre 2015*. Disponible sur : http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&referer=/english/&Lang=F (Consulté le 21/03/2018)

www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&referer=/english/&Lang=F (Consulté le 21/03/2018)

Organisation hydrographique internationale. *État des levés hydrographiques et de la cartographie marine à travers le monde*. Publication C-55. OHI, 19 décembre 2016

Parker Bruce. *When Bathymetry Determines Who Might Live and Who Might Die*. Hydro International, novembre-décembre 2013, vol. 17, n° 8, p. 16-19

Roudil Pascal et al. *The French tsunami warning center for the Mediterranean and northeast Atlantic: CENALT*. Journal of Tsunami Society International, janvier 2013, vol. 32, n° 1, p. 1-7

Nations Unies. *72/73. Les océans et le droit de la mer. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 5 décembre 2017*. Disponible sur : http://www.un.org/fr/documents/view_doc.asp?symbol=A/RES/72/73 (Consulté le 11/02/2018)

ABSTRACT

World Hydrography Day, celebrated every year on June 21st, is certainly not the best known of the world days on the international calendar. Although it was recognized by the United Nations General Assembly in 2005, its coincidence with the first day of summer in the Northern Hemisphere and with Music Day does not facilitate its appreciation! One must also admit that hydrography is not the most notorious maritime activity either, and yet without hydrography, mariners and all other users of the sea would find it very difficult to ply their trade. With the 2030 Agenda for Sustainable Development adopted by the United Nations in 2015, hydrography is gaining momentum as a key ingredient for the sustainable development of the oceans. The theme selected by the International Hydrographic Organization for World Hydrography Day 2018: "Bathymetry - the foundation for sustainable seas, oceans and waterways" aims at better highlighting the role of hydrography in that respect. This article recalls what hydrography is about and explains the challenges to be met.

Les représentations planes de la Terre

■ Françoise DUQUENNE

Depuis l'antiquité on sait que la Terre est ronde ou presque. Cependant il s'avère depuis toujours très pratique d'en faire une représentation plane, que ce soit sur du papier ou de nos jours sur un écran d'ordinateur. On appelle très souvent ces représentations planes de la Terre des "projections cartographiques", terminologie associée à "carte", voire à "plan cartésien". Remarquons ici qu'elles ne sont pas toutes des projections au sens mathématique et géométrique du terme. Il existe de nombreuses représentations planes et nous nous proposons ici, non pas d'en faire un inventaire mais de présenter leurs caractéristiques, de voir comment on peut les classer et comment on les choisit selon leur utilisation.

Qu'est-ce qu'une représentation plane de la Terre

On choisit tout d'abord une forme géométrique approchée de la Terre débarrassée de ses reliefs. Lorsque l'on veut faire une représentation à très petite échelle (par exemple 1/100 000 000) on choisit une sphère, tandis que pour les cartes à moyennes et grandes échelles on utilise un ellipsoïde de révolution. Leurs dimensions proches de 6 400 km pour le rayon d'une sphère et un aplatissement proche de 1/300 pour un ellipsoïde, diffèrent de plusieurs centaines de mètres. Historiquement quelques sphères (sphère de Picard : $R=6371598$ m) et de nombreux ellipsoïdes (Clarke, Hayford, Bessel, Krakovski...) ont été utilisés. La tendance actuelle est de choisir quelle que soit l'échelle de la carte l'ellipsoïde WGS84 ou ce qui est équivalent à mieux que le millimètre l'ellipsoïde international GRS80.

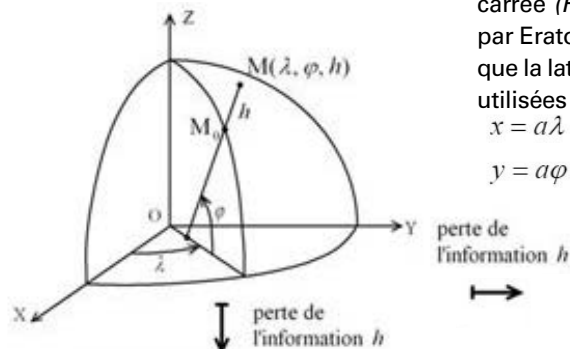


Figure 1. Principe d'une représentation plane

MOTS-CLÉS

Représentations planes, module linéaire, altération linéaire, conforme, équivalente, cylindrique, conique, indicatrice de Tissot

Un point de la Terre qui est sur la surface topographique est repéré par ses coordonnées géographiques : longitude (λ), latitude (ϕ) et hauteur (h).

La première étape consiste à projeter le point sur l'ellipsoïde en un point M_0 qui a les mêmes longitude et latitude que le point M .

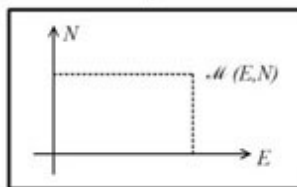
La deuxième étape est une transformation de l'ellipsoïde en plan, en réalisant une application qui à toutes coordonnées (λ, ϕ) du point fait correspondre des coordonnées du plan cartésien (x, y). L'application réciproque existe. En général l'expression mathématique est de la forme

$$\begin{aligned} x &= f(\lambda, \phi) \\ y &= g(\lambda, \phi) \end{aligned}$$

Remarque : le plus souvent, mais pas systématiquement, l'axe x est dirigé vers l'Est et y vers le Nord et les coordonnées (x, y) se notent aussi (E, N) pour *easting* et *northing*.

Ces fonctions peuvent être très compliquées mais aussi très simples comme par exemple la représentation plate carrée (Figure 4) qui était déjà utilisée par Eratosthène (273-192 av. J.-C.) bien que la latitude et longitude n'étaient pas utilisées à cette époque.

$$\begin{aligned} x &= a\lambda \quad \text{où } a \text{ est le rayon de la sphère} \\ y &= a\phi \quad \text{représentant la Terre} \end{aligned}$$



Les déformations

Toute projection d'un ellipsoïde sur un plan induit des déformations. On peut prendre comme image un ballon de baudruche que l'on essaie d'aplatir sur une table et que l'on va étirer pour arriver au résultat, alors on déforme mais pas de la même façon partout. Autre analogie la peau d'une orange que l'on veut aplatir sur la table, et qui va se déchirer jusqu'à ce que les morceaux puissent être aplatés avec des déformations très petites et non déchirantes. Pour représenter la Terre entière, donc à des échelles très petites, on va plutôt procéder comme pour le ballon de baudruche, tandis que pour les grandes ou moyennes échelles (ex. : 1/5 000, 1/25 000, etc.) on va découper la Terre en zones, correspondant à un continent, un pays, à des zones plus petites délimitées par des méridiens et des parallèles. Pour chacune de ces zones, on définira une projection et ses paramètres qui feront le moins de déformation.

Les longueurs sont toujours altérées car la sphère ou l'ellipsoïde ne sont pas développables sur un plan et pour quantifier cette déformation on introduit le **module linéaire** : $\mu = \frac{dS}{ds}$

Avec ds élément de longueur infinitésimal sur l'ellipsoïde et dS l'élément correspondant sur le plan.

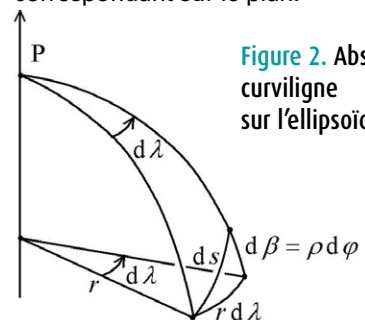


Figure 2. Abscisse curviligne sur l'ellipsoïde

$$ds^2 = r^2 d\lambda^2 + \rho^2 d\phi^2$$

r : rayon du parallèle

$$r = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}} \cos \phi$$

ρ : rayon de courbure du méridien

$$\rho = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}}$$

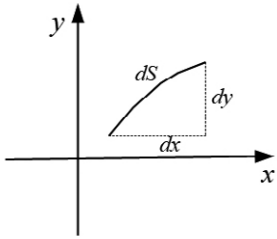


Figure 3. Abscisse curviligne sur le plan

$$dS^2 = dx^2 + dy^2$$

$$dx = \frac{\partial f(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial f(\lambda, \varphi)}{\partial \varphi} d\varphi$$

$$dy = \frac{\partial g(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial g(\lambda, \varphi)}{\partial \varphi} d\varphi$$

$$dS^2 = \left(\left(\frac{\partial f(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda} \right)^2 + \left(\frac{\partial g(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda} \right)^2 \right) d\lambda^2$$

$$+ \left(\left(\frac{\partial f(\lambda, \varphi)}{\partial \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial g(\lambda, \varphi)}{\partial \varphi} \right)^2 \right) d\varphi^2$$

$$+ 2 \left(\frac{\partial f(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda} \times \frac{\partial f(\lambda, \varphi)}{\partial \varphi} \right) d\lambda d\varphi$$

$$+ 2 \left(\frac{\partial g(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda} \times \frac{\partial g(\lambda, \varphi)}{\partial \varphi} \right) d\lambda d\varphi$$

Le module linéaire $\mu = \sqrt{\frac{dS^2}{ds^2}}$

est donc une fonction de (λ, φ) qui dépend de la position du point et de la direction dans laquelle on regarde la déformation.

En un point de coordonnées (λ, φ) varie entre deux valeurs : $\mu_1 < \mu < \mu_2$. La valeur maximale μ_2 peut être infinie ∞ .

On appelle altération linéaire la quantité $\varepsilon = \mu - 1$ exprimée souvent en mètres par kilomètres.

On appelle **isomètre** une courbe telle qu'en tout point $\mu = \text{constante}$. Si $\mu = 1$ elle est dite **automécoïque**.

Pour visualiser les déformations on utilise l'indicatrice de Tissot. On trace sur l'ellipsoïde un petit cercle de rayon 1 (l'unité importe peu), la transformée de ce cercle par la représentation plane est toujours une ellipse de demi-grand axe μ_2 et de demi-petit axe μ_1 , c'est l'**indicatrice de Tissot**. Les représentations pour lesquelles $\mu_1 = \mu_2$ en tout point sont dites conformes, l'indicatrice de Tissot est un cercle. Elles ont deux intérêts, le premier c'est que l'altération linéaire en un point est la même dans toutes les directions, et le deuxième les angles sont conservés dans la transformation.

Les représentations pour lesquelles $\mu_1 \mu_2 = 1$ en tout point sont dites équivalentes. Elles conservent les surfaces car la surface de l'ellipse $\pi \mu_1 \mu_2 = \pi$ est égale à la surface du cercle de rayon 1. Les représentations qui ne sont ni conformes, ni équivalentes sont dites **aphylactiques**.

Les figures 4, 5, 6 et 7 montrent des exemples de projections pour lesquelles on voit les images des méridiens et de parallèles et au croisement on a figuré les indicatrices de Tissot.

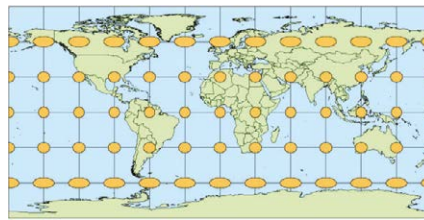


Figure 4. Plate carrée : cylindrique équidistante

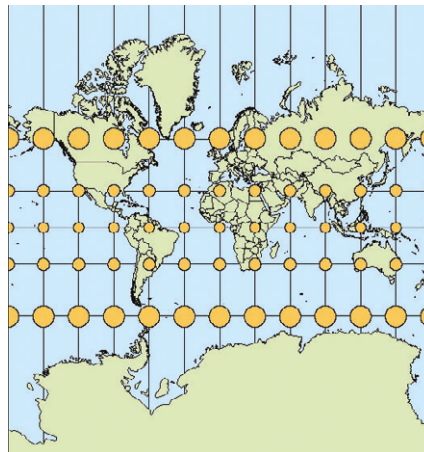


Figure 5. Mercator : cylindrique conforme

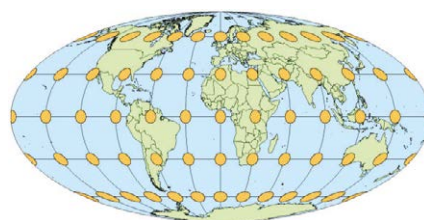


Figure 6. Mollweide : méri-cylindrique

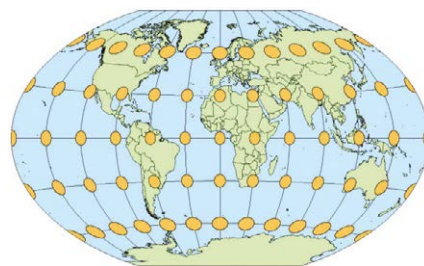


Figure 7. Winkel-Tripel

Ainsi on voit que pour la projection "plate carrée" (Figure 4), sur l'équateur l'indicatrice de Tissot est un cercle, puis en se déplaçant vers les pôles l'indicatrice de Tissot s'aplatit et s'élargit, il y a une dilatation des zones polaires. Cette projection n'est ni conforme, ni équivalente. Les images des parallèles étant à égale distance on dit qu'elle est **équidistante**. La projection Mercator est un exemple de projection conforme. L'indicatrice de Tissot est un cercle quel que soit le lieu, et ce cercle devient de plus en plus grand quand on se rapproche des pôles. La déformation des longueurs est la même dans toutes les directions en un lieu donné mais son amplitude augmente avec la latitude. Pour la projection de Mollweide (Figure 6) l'indicatrice de Tissot est une ellipse dont le grand axe est dirigé selon l'image du méridien. L'ellipse s'aplatit en s'approchant des pôles mais garde une aire constante. Cette projection est équivalente. Aucune représentation plane de l'ellipsoïde n'est à la fois conforme et équivalente. Par contre on peut comme dans le cas de la projection de Winkel-Tripel faire en sorte que les déformations soient minimisées, ici l'indicatrice est presque un cercle dont l'aire varie peu.

Image du canevass

Les méridiens et les parallèles qui sur la sphère ou sur l'ellipsoïde sont des cercles ou des ellipses peuvent être transformés par la représentation en toutes sortes de courbes. Il est habituel de procéder à une classification des représentations planes selon ces courbes de la manière suivante :

Les représentations cylindriques : les images des parallèles sont des droites parallèles et celles des méridiens des droites parallèles perpendiculaires aux premières (Figure 4, 5, 9).

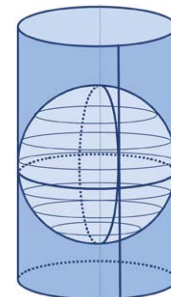


Figure 8. représentation cylindrique [5]

▶ Par analogie, c'est comme si on enveloppait la sphère par un cylindre que l'on déplaçait ensuite, mais attention la transformation n'est pas en général une projection géométrique.

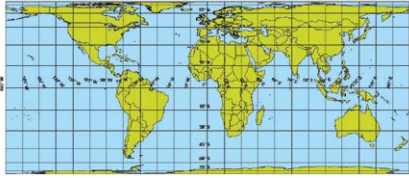


Figure 9. Cylindrique équivalente

Les projections méridiennes (ou pseudo-cylindriques) : les images des parallèles sont des droites parallèles, celles des méridiens sont des courbes (arc de cercle, arc de sinus (Figure 10), arc d'ellipse (Figure 6), etc.)



Figure 10. Sanson : méridienne sinusoidale

Les projections coniques : les images des parallèles sont des arcs de cercles concentriques, celles des méridiens sont des droites concourantes au centre des arcs de cercles qui est aussi l'image du pôle (nord ou sud) (Figures 12, 13). Par analogie, c'est comme si on enveloppait la sphère par un cône que l'on déplaçait ensuite, mais attention la transformation n'est pas en général une projection géométrique.

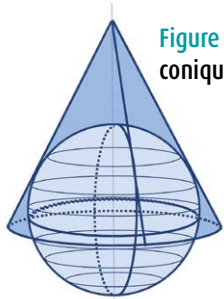


Figure 11. Représentation conique [5]

Figure 12. Conique conforme

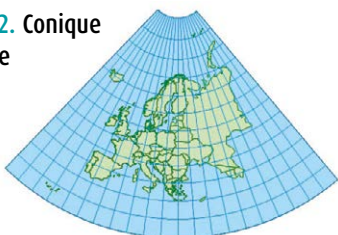


Figure 13. Conique équivalente

Les projections méridiennes (ou pseudo-conique) : les images des parallèles sont des arcs de cercles concentriques, celles des méridiens sont des courbes quelconques passant par l'image du pôle.

Les projections azimutales (cas particulier de conique) : les images des parallèles sont des cercles concentriques, celles des méridiens sont des droites concourantes au centre des arcs de cercles qui est aussi l'image du pôle (nord ou sud) (Figure 15).

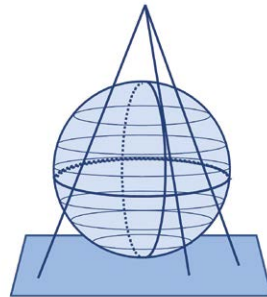


Figure 14. Représentation azimutale [5]

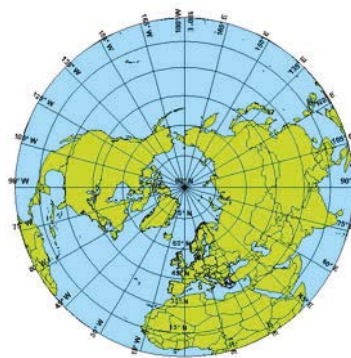


Figure 15. Azimutale équivalente

Les projections poly-coniques : les images des parallèles sont des arcs de cercles non concentriques, dont le centre est situé sur une droite, image du méridien origine, et les images des autres méridiens sont des courbes quelconques (Figure 16)



Figure 16. Polyconique

L'aspect

Pour illustrer l'aspect, prenons l'exemple des projections cylindriques. On dit que la projection est directe lorsque l'axe du cylindre est confondu avec l'axe des pôles, elle est oblique lorsque l'axe du cylindre est incliné selon une direction qu'on appelle axe des pseudo-pôles, et transverse lorsque l'axe du cylindre est dans l'équateur. On associe à l'axe des pseudo-pôles un pseudo-canevas, composé de pseudo-parallèles et pseudo-méridiens. On applique au pseudo-canevas la classification vue précédemment, par exemple pour une projection cylindrique oblique les pseudo-méridiens et pseudo-parallèles seront des droites perpendiculaires les unes aux autres, ce qui n'est pas le cas pour les méridiens et parallèles. Mathématiquement on applique les mêmes fonctions mais en utilisant les pseudo-longitudes et pseudo-latitudes (coordonnées Cassini-Soldner). On peut aussi appliquer l'aspect oblique aux représentations coniques et azimutales.

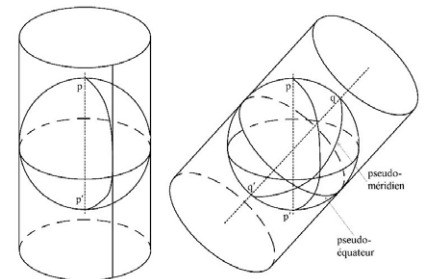


Figure 17. Aspect direct et oblique

On distingue aussi les représentations sécantes et tangentielles : en reprenant l'analogie, dans le premier cas le cône ou le cylindre coupe la sphère, et dans

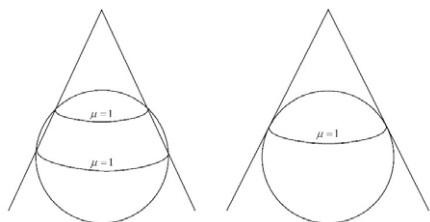


Figure 18. Aspect sécant et tangent

l'autre cas il est tangent. Ce que l'on peut exprimer dans le premier cas, il existe deux isomètres automécoïques ($\mu = 1$) et dans le deuxième il n'y en a qu'une.

Le nom des représentations planes

Certaines représentations peuvent être nommées à l'aide de leurs caractéristiques, comme par exemple la projection conique conforme, mais souvent elles portent le nom de leur inventeur, Lambert pour la même projection. On peut citer les noms fréquemment rencontrés : Aïtoff, Albers, Bonne, Cassini, Eckert, Gauss, Gall, Guillaume Postel, Hammer, Hatt, Goode, Krüger, Laborde, Lorgna, Lambert, Mercator, Miller, Mollweide, Peeters, Sanson, Soldner, Wagner, Winkel. Il est évidemment plus pratique d'utiliser la première méthode de désignation d'une projection, d'autant que plusieurs noms peuvent représenter la même projection, comme par exemple la représentation cylindrique équidistante qui s'appelle Cassini ou Soldner selon le pays. Par ailleurs un même nom peut être utilisé pour des projections différentes, comme Lambert pour les projections coniques conforme et équivalente. Certaines projections sont obtenues par une perspective géométrique sur un plan, un cône ou un cylindre tangent à la sphère, et selon le point de vue qui peut être le centre de la sphère, un pôle, l'infini, elles sont appelées gnomoniques, stéréographiques, ou orthographiques.

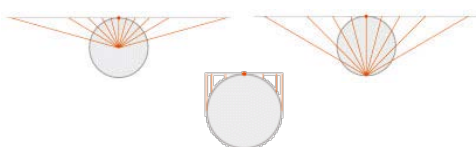


Figure 19. Projections gnomonique, stéréographique, orthographique.

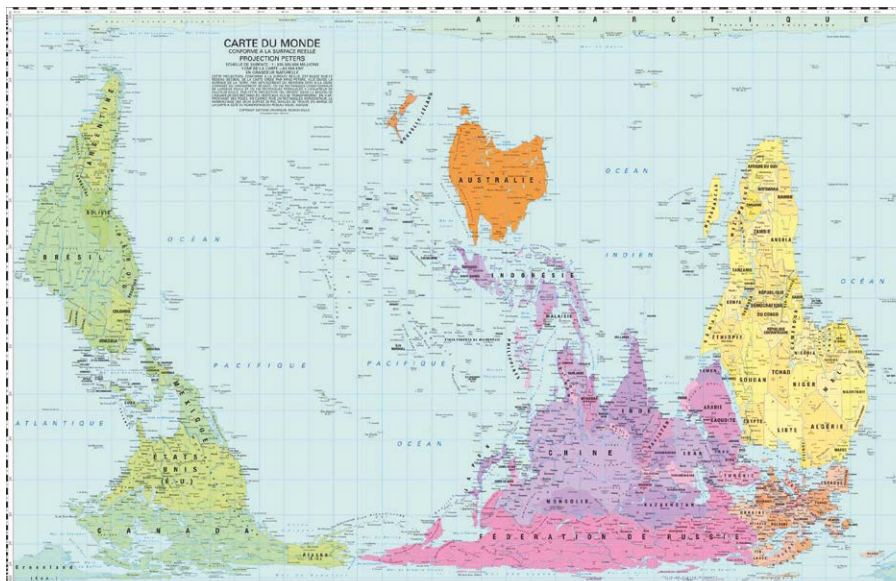


Figure 20. Le Monde 2008 - projection cylindrique équivalente (Peters)

Quelles projections pour quelles applications ?

■ Cartes du monde (Atlas)

Les cartes du monde que l'on trouve dans les Atlas peuvent être choisies selon divers critères. L'esthétique en est un, la projection de Molweide (Figure 6) par exemple est souvent choisie, car sa forme rappelle celle de la Terre, tandis que celle de Sanson (Figure 10) est plus originale. Les projections équivalentes sont très utilisées, car elles respectent

l'importance des pays en superficie et sont très utiles pour des cartes thématiques : par exemple si on représente le nombre d'habitants d'un pays par un cercle dont le rayon dépend de la population, pour avoir une impression de densité réaliste, il faut conserver le rapport des superficies des pays. En général le haut de la carte est vers le nord, mais il existe des cartes ayant le sud en haut. De même le méridien central n'est pas toujours le méridien de Greenwich. La carte du monde (Figure 14) est centrée

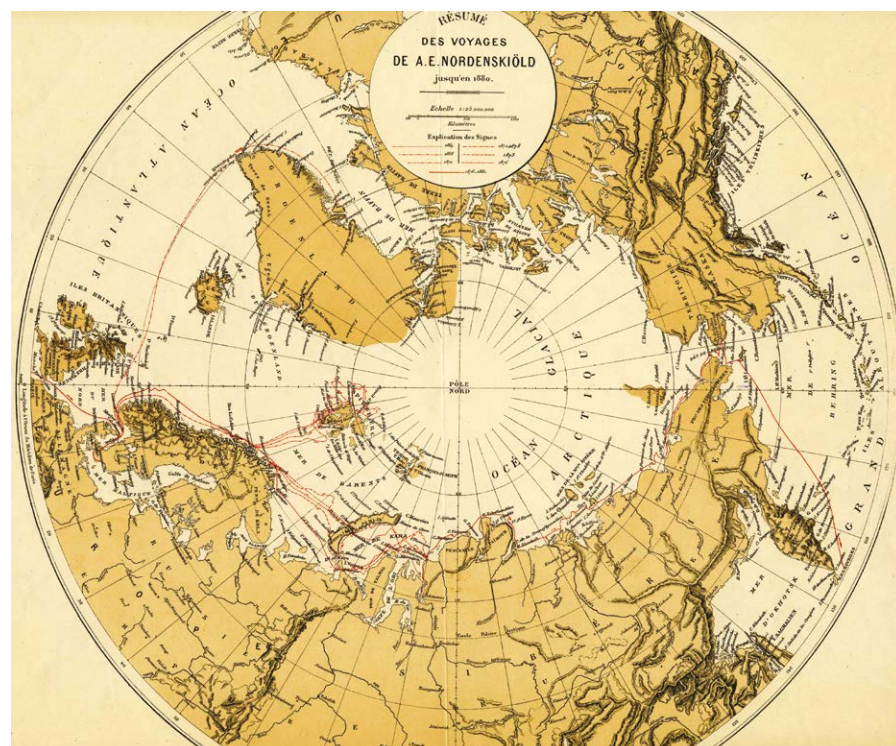


Figure 21. Carte du pôle nord (1880) : projection azimutale



utilisées sont conformes, ce qui permet de conserver les angles mais aussi les longueurs étant déformées de la même façon dans toutes les directions, il est facile de corriger les distances mesurées pour les reporter sur la carte. Les projections les plus utilisées sont la conique conforme, les cylindriques conformes obliques ou transverses, et la projection stéréographique (azimutale conforme) oblique.

Les représentations conformes possèdent des propriétés particulières qui vont faciliter la réduction des observations d'angles et de distances faites sur le terrain

- L'indicatrice de Tissot est un cercle.
- Le module linéaire ne dépend que de la position du point.
- L'altération angulaire est toujours nulle.
- On note μ_0 , la valeur minimale du module linéaire. En un point quelconque on a $\mu_0 \leq \mu \leq \infty$.
- L'isomètre dont le module linéaire vaut μ_0 est choisie au centre de la zone à cartographier et est nommée isomètre centrale.
- On choisit $\mu_0 < 1$ et donc il existe nécessairement des isomètres pour lesquelles $\mu = 1$. Elles sont automécoïques. Au voisinage de l'isomètre centrale, en un point m à distance d de celle-ci, le module linéaire se développe sous la forme :

$$\mu = \mu_0(1 + pd^2 + o(d^2))$$

où p dépend un peu du point m et où $o(d^2)$ est un infiniment petit d'ordre supérieur à d^2 .

- Soit s la distance séparant deux points m_1 et m_2 de l'ellipsoïde (figure 25). La distance correspondante en plan est S . Si l'arc de courbe sur l'ellipsoïde est une géodésique, son image plane est peu courbée et, sur le plan, on peut confondre la longueur de l'image de la géodésique et la longueur du segment M_1M_2 .

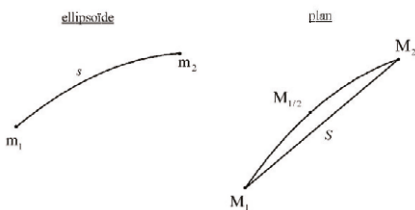


Figure 25. Réduction d'une distance de l'ellipsoïde au plan.

- En toute rigueur, S est donné par l'intégrale curviligne :

$$S = \int_{m_1, m_2} \mu ds$$

- Pour une distance courte (quelques centaines de mètres), μ peut être considéré comme constant :

$$S = \mu s$$

- Pour des distances plus longues, il est nécessaire de calculer une valeur moyenne du module linéaire :

$$S = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} s$$

- Pour les distances très longues (plusieurs dizaines de kilomètres), on utilise la formule des trois niveaux, qui nécessite le calcul du module linéaire aux deux extrémités et au milieu de l'arc de géodésique :

$$S = \frac{\mu_1 + 4\mu_{1/2} + \mu_2}{6} s$$

- Une transformation conforme conserve les angles. Cependant, l'image plane d'une ligne géodésique de l'ellipsoïde n'est en général pas une géodésique du plan (une droite), mais une courbe tournant sa concavité vers l'isomètre centrale (figure 26). Ceci entraîne qu'une petite correction doit être apportée aux angles horizontaux observés avant de les utiliser pour des calculs planimétriques. Sur la partie gauche de la figure 26, l'azimut de la direc-

tion m_1m_2 est considéré comme égal à l'angle entre l'ellipse méridienne vers le nord et la ligne géodésique. En projection conforme, l'azimut est conservé, c'est l'angle entre l'image du méridien et l'image de la géodésique (courbe M_1M_2 sur la partie droite de la figure).

- Pour utiliser les formules classiques de la géométrie plane, il faut corriger l'azimut du petit angle entre l'image de la géodésique et le segment de droite M_1M_2 . Cette correction est notée dV , on l'obtient à partir de ρ_g , rayon de courbure de l'image de la géodésique. Celle-ci tourne sa concavité vers l'isomètre centrale, vers laquelle se trouve donc le centre de courbure C . On appelle isomorphes les courbes orthogonales aux isomètres, et on note S_v leur abscisse curviligne. La distance entre deux isomètres d'équations $\mu = Cste$ et $\mu + d\mu = Cste$ est donc la différentielle de l'abscisse curviligne sur l'isomorphe, dS_v . On désigne par i l'angle entre l'isomorphe et l'image de la géodésique. ρ_g est donné par la formule de Schols :

$$\frac{1}{\rho_g} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial S_v} \sin i \quad (1)$$

- On peut montrer que, comme ρ_g n'est pas rigoureusement constant entre M_1 et M_2 , il convient de le calculer pour le point $M_{1/3}$ situé sur l'image de la géodésique au tiers de M_1M_2 . On a ensuite :

$$dV = \frac{1}{2} \frac{S}{\rho_{g1/3}}$$

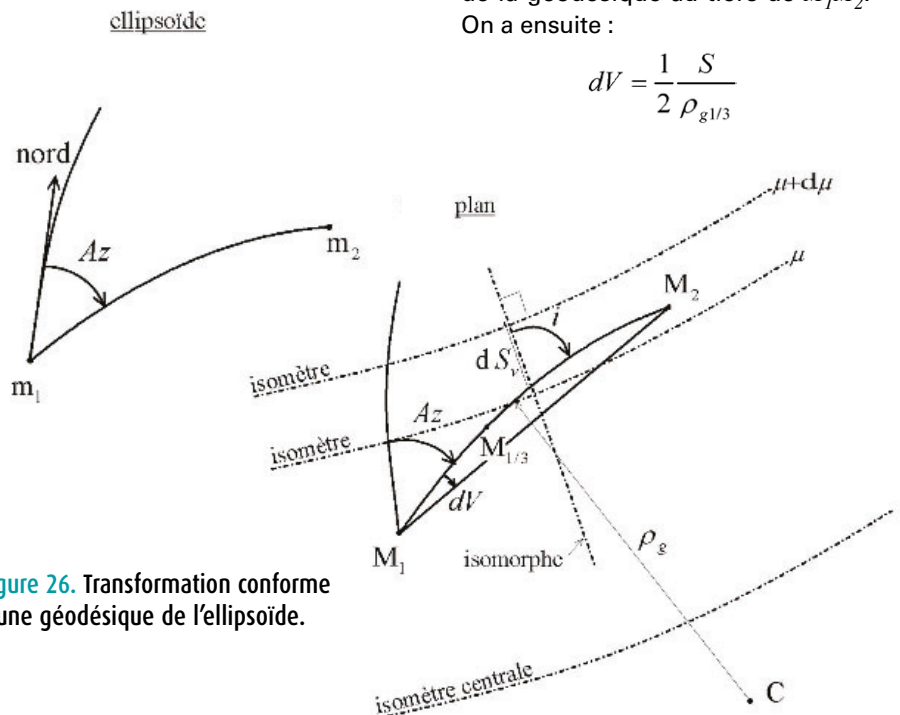


Figure 26. Transformation conforme d'une géodésique de l'ellipsoïde.

- Suivant la précision requise, la projection utilisée, la longueur des visées et l'éloignement de l'isomètre centrale, il convient de contrôler si dV peut être négligé.

■ Convergence des méridiens

Les images des méridiens peuvent être très variées, droites parallèles, droites sécantes, cercles, courbes quelconques. On choisit un méridien origine, comme axe des y, et en un point quelconque l'image du méridien fait un angle γ avec l'axe des y qu'on appelle convergence des méridiens.

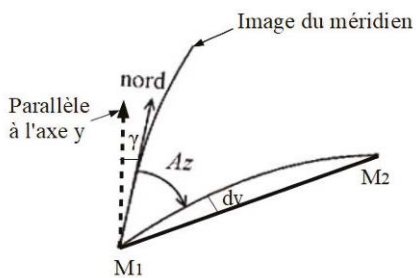


Figure 27. Passage azimut vers gisement

$$V_{M_1M_2} = Az_{M_1M_2} + \gamma + dv$$

$V_{M_1M_2}$: gisement : angle entre l'axe des Y et la direction M_1M_2

$Az_{M_1M_2}$: azimut : angle entre le méridien et la direction M_1M_2

γ : convergence de méridiens = gisement de l'image du méridien.

Conclusion

Ces quelques pages ont résumé les façons les plus répandues de représenter la Terre sur un plan. Cependant il en existe de nombreuses autres et l'imagination n'a pas de limite. On peut prendre ici comme exemple la carte anamorphique de la SNCF qui à la place des distances, utilise la durée des trajets des trains.

Cet article dont le but est une vue générale sur les représentations planes de la Terre sera complété ultérieurement dans la revue XYZ par l'étude détaillée des représentations planes les plus utilisées en topographie et cartographie, en particulier les représentations légales françaises et celles spécifiées dans la directive européenne INSPIRE. ●

Les cartes des figures 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 18, 19, 21 ont été générées par les logiciels et données Mapinfo et Arcgis.

Remerciements à Bernard Bèzes, ex responsable de la cartothèque de l'IGN qui a fourni les cartes de la collection IGN des figures 14, 15, 16, 17.

Références

- [1] Bugayevskiy M. Snyder J., 1995, *Map Projections*, Taylor&Francis
- [2] Duquenne F. et H., 2003, *cours de géodésie*, ESGT, CNAM. <http://www.aftopo.org/FR/ouvrages-34.html>
- [3] Duquenne F., *Les projections cartographiques*, bulletin de liaison des membres de la Société de Géographie n°18, juin 2012.
- [4] Reignier F. 1957, *Les systèmes de projections et leurs applications*, IGN
- [5] www.regard-sur-la-terre.over-blog.com

ABSTRACT

This paper presents a general view of the representations of the Earth onto a plane surface. Both the mathematical characteristics of the projections and their geometric characteristics, including projected images of the meridians and parallels, are highlighted. Then the direct and inverse aspects are explained as well as the classifications by purpose of use, such as world atlas, navigation and surveying. The notions of scale factor, convergence of meridians and reduction to the chord are explained. The paper will be completed in detail within the next issues by the studies of projections mostly used in surveying.

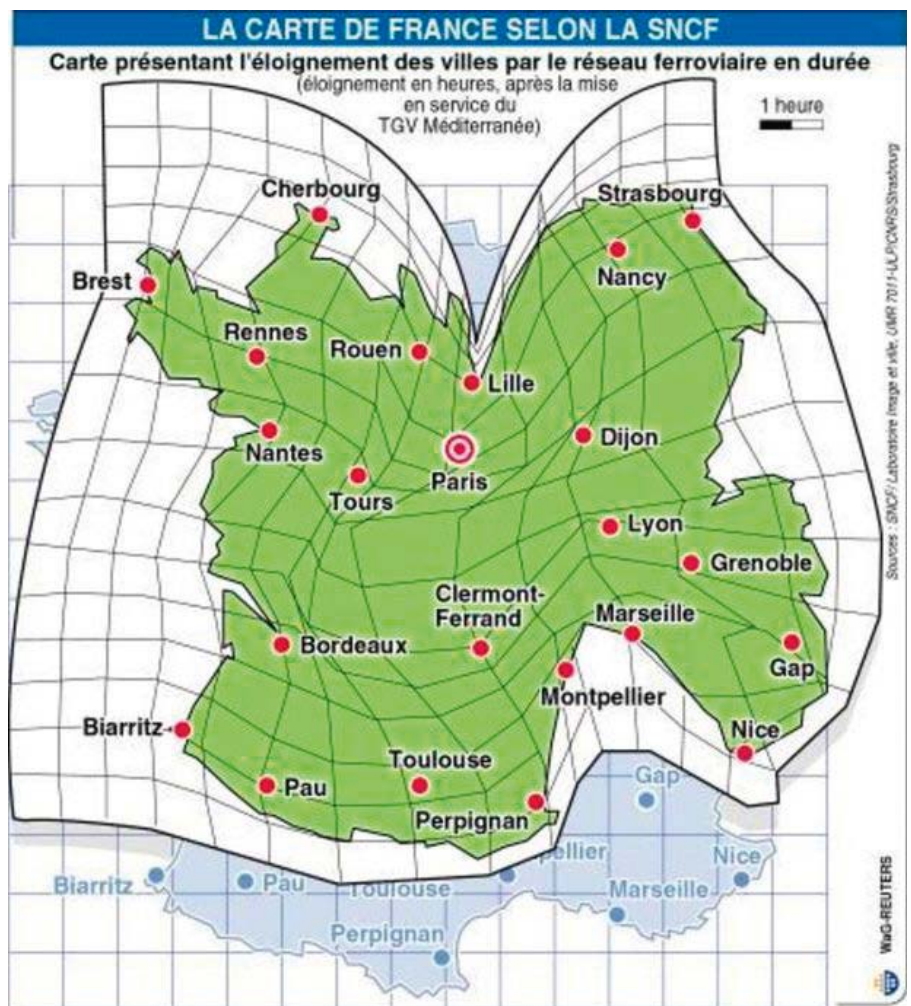


Figure 28. Carte anamorphique de la SNCF

La campagne géodésique de SNCF Réseau pour la régénération de son infrastructure : de la préparation à la diffusion

Florian BIROT - Alex BONGIBAUT - Pierre LASSEUR - Mathieu REGUL

SNCF Réseau est un EPIC créé en 2015 lors de la réforme ferroviaire. C'est l'entité gestionnaire du réseau ferré national, en charge notamment de sa maintenance et de sa modernisation. C'est dans ce cadre, et sous l'impulsion d'un programme ambitieux, que SNCF Réseau va renouveler plusieurs centaines de kilomètres de voies et d'installations caténaïres chaque année. L'ensemble de ce linéaire fera l'objet d'investigations topographiques à destination des études projet. Que la méthode de levé soit de la tachéométrie traditionnelle ou de la lasergrammétrie, le besoin de géoréférencement précis est crucial sur de telles distances. L'existence d'un canevas alliant à la fois précision relative et absolue est donc nécessaire. La division ATT (Assistance Travaux et Topographie), rattaché à la Direction Ingénierie et Projets de SNCF Réseau, réalise une importante partie des canevas principaux aux abords des futurs chantiers de renouvellement. La campagne de l'année 2017 aura vu ses équipes réaliser environ 500 km de canevas sur une dizaine de zones. Devant ce volume important, les procédures de préparation, d'acquisition, traitement et livraison ont été revues. Nous proposons donc de détailler ici les règles de l'art et les pratiques du métier relatives aux observations et au calcul d'un canevas linéaire au sein de SNCF Réseau, en montrant en parallèle l'apport des outils digitaux et de la programmation dans notre travail.

MOTS-CLÉS

géodésie, canevas, GNSS, nivellement, SNCF Réseau, France

Topologie d'un canevas

Un canevas est une densification en points pérennes, aux abords du chantier à traiter, du réseau géodésique localement en vigueur. Les canevas conformes aux prescriptions internes de SNCF Réseau sont construits de la façon suivante.

Pour des levés par méthode classique, un couple de points intervisibles et interdistant de 300 mètres est installé tous les 1 500 mètres le long de la voie. Dénommés "canevas d'ensemble principaux", ils excèdent désormais rarement un linéaire de 10 km. Pour des levés par lasergrammétrie embarquée, méthode à présent courante chez SNCF Réseau, l'interdistance entre couples consécutifs est élevée à 5 km, tout en conservant l'intervisibilité des points d'un même couple. Nous parlons alors de "canevas pseudo-géodésiques". Pour ces canevas, les points sont en premier lieu utilisés comme pivots RTK lors de la phase de positionnement des points de calage – ou GCP – le long du parcours réalisé avec le système LiDAR, puis comme pivot PPK pour le calcul de sa trajectoire. Si le nuage de points n'est pas exhaustif sur certains endroits et que des compléments par une autre méthode de levé sont nécessaires, les points de canevas peuvent, soit servir de pivots encadrant pour densifier la polygonale par GNSS, soit servir de pivots RTK, soit de points encadrants pour une polygonale tachéométrique.

Les points sont matérialisés par des bornes à ancrages de 80 cm, ou des rivets scellés si un support béton pérenne est disponible.



Figure 1. Une borne aux abords d'une ligne ferroviaire

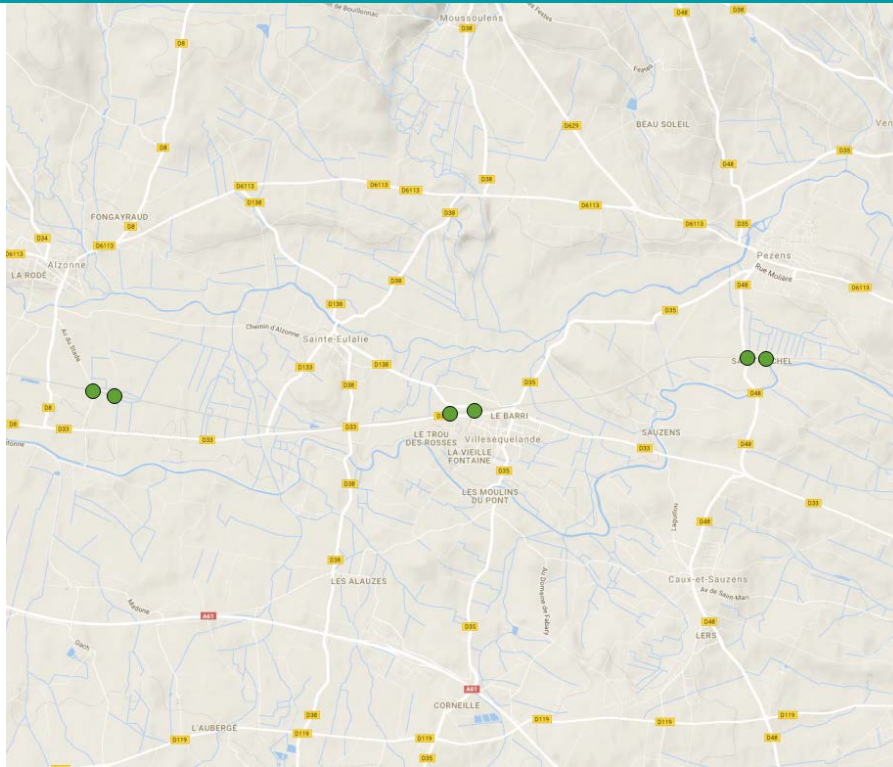


Figure 2. Topologie d'un canevas pseudo-géodésique (en vert)



Les précisions attendues sont les suivantes :

- en absolu : < 2 cm en planimétrie et < 1 cm en altitude
- en relatif : de l'ordre de 1 ppm sur chaque composante

Préparation d'un canevas

■ Une préparation semi-automatisée

La préparation d'un canevas consiste à établir une carte contenant plusieurs informations : l'emplacement approché

des points à installer, les repères de nivellement à proximité pour le rattachement altimétrique, les sites géodésiques précis du réseau de base français (RBF) et stations du RGP environnantes pour le rattachement planimétrique.

Au vu du volume d'opérations à mener, et donc la répétition des travaux de préparation, une réflexion a été menée pour accélérer et optimiser cette phase, par l'automatisation des tâches redondantes, jusqu'à la diffusion des documents préparatoires sur serveur, directement accessibles sur le terrain au moyen d'une tablette par exemple.

Pour préparer un canevas, il faut connaître la zone chantier, ce qui, en milieu ferroviaire, se résume à 3 paramètres :

- le numéro de la ligne : un identifiant unique à 6 chiffres permettant de différencier les "polylignes chemin de fer" ;
- le PK (Point Kilométrique) de début de chantier : abscisse curviligne le long de la ligne donnant le point amont du chantier ;
- le PK de fin : abscisse curviligne le long de la ligne donnant le point aval du chantier.

La connaissance de ces paramètres

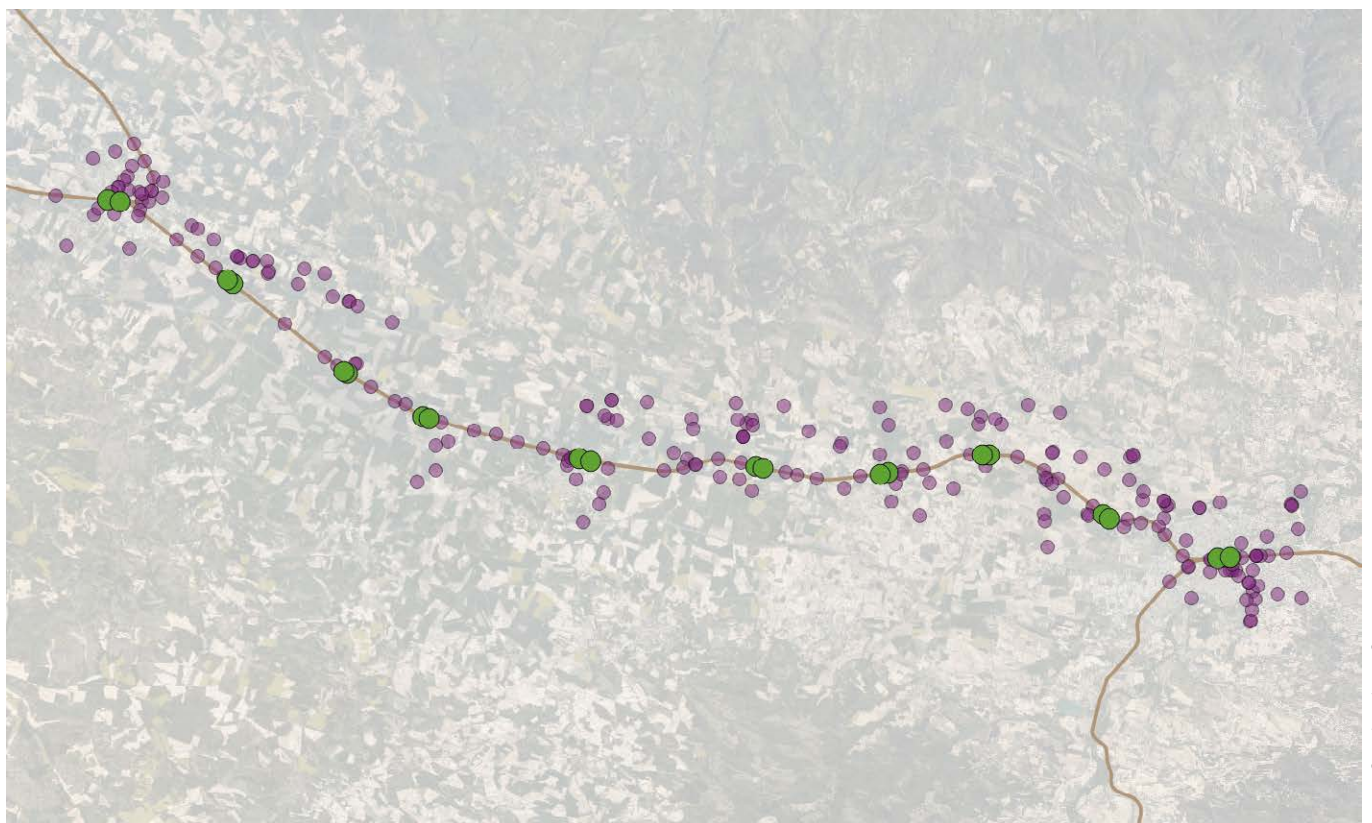


Figure 3. Repères de nivellement (en violet) aux abords du chantier



permet dans un premier temps de faire le piquetage prévisionnel des points de canevas. Ce pré-positionnement des points se fait encore manuellement en les plaçant sur un fond de carte – BD ORTHO OU BD SCAN – et en privilégiant la simplicité des accès (passages à niveaux, quais de gare) et les zones dégagées (hors d'un tunnel ou d'un canyon). Cette opération est la seule qui requiert une intervention humaine, mais elle est d'autant plus justifiée qu'un opérateur qui place lui-même les points sur une carte s'approprie mieux le chantier à venir.

À partir des 3 paramètres ferroviaires cités ci-dessus, on est capable de trouver automatiquement les repères de nivellement, sites géodésiques et stations RGP à utiliser lors des opérations de rattachement. Pour cette étape, la division ATT se sert des couches géoréférencées du NGF, du RBF, et du RGP, dans un format ShapeFile.

Pour les repères de nivellement du NGF, une requête spatiale est effectuée pour obtenir tous les repères NGF en bon état et situés à moins de 2 km de la zone chantier. Cette routine offre un gain de temps très important par rapport à une méthode manuelle qui consisterait à télécharger les fiches depuis le serveur de fiches de l'IGN. Suivant la taille du chantier, l'opération peut prendre plusieurs heures (cas d'un canevas de 100 km de long par exemple). Avec ce programme, la requête renvoie son résultat en moins d'une minute.

Pour les sites RBF, la sélection est faite sur les plus proches voisins du chantier, et dont la précision planimétrique est indiquée " < 1 cm". Puisque ce type de points va être utilisé lors du contrôle absolu pendant l'ajustement du réseau GNSS, il est nécessaire d'avoir la meilleure précision disponible. La précision des points du RBF n'est pas toujours inférieure à 1 cm, et certains sites n'ont que des points précis à 5 voire à 10 cm en planimétrie. On ne peut donc les utiliser pour contrôler des points que l'on souhaite précis à mieux que 2 cm. La densité de sites RBF, environ un tous les 25 km, fait qu'on en utilise en général 3 à 4 par chantier. L'opération prend une fraction de seconde, là où il aurait fallu quelques minutes à la main sur le serveur de fiches de l'IGN.

Canevas Castelhaudary – Carcassonne

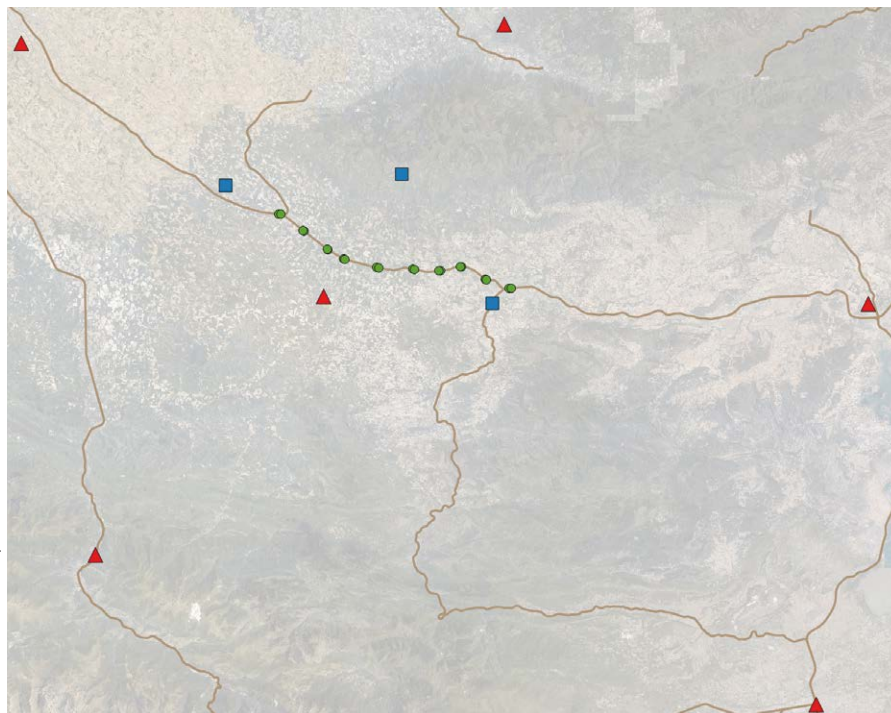


Figure 4. Stations RGP encadrant le chantier (en rouge) – sites RBF de précision 1 cm aux abords du chantier (en bleu)

Enfin, les stations RGP sont sélectionnées en tant que plus proches voisins de l'ensemble {points de canevas + sites RBF}. On vérifie que cette sélection constitue l'enveloppe convexe du réseau complet.

Dans un logiciel Open Source comme QGIS, toutes ces étapes peuvent être automatisées au moyen de scripts Python utilisant les outils PyQgis.

Le réseau {canevas + NGF + RBF + RGP} est alors formé. Il est exporté avec toutes les métadonnées vers des outils de visualisation cartographique, soit au format KML à ouvrir avec Google Earth, soit au format CSV pour être diffusé sous une URL BatchGeo. Le catalogue de fiches signalétiques – parfois plusieurs centaines – n'a pas besoin d'être imprimé. L'URL de la fiche étant une métadonnée, elle peut être téléchargée d'un simple clic sur le champ correspondant dans l'outil choisi. L'accès aux points de canevas et aux sites RBF en véhicule est également facilité, car ils peuvent être directement définis comme point d'arrivée dans un itinéraire sous l'appli de navigation utilisée, sans jamais avoir besoin de taper les coordonnées à la main.

La préparation complète d'un canevas pseudo-géodésique de 100 km prend

environ une heure pour un opérateur expérimenté sur ces travaux, contre 2 jours auparavant, le temps étant principalement dédié au pré-piquetage puis au contrôle visuel des tâches automatisées.

Mise en place, observation et calcul d'un canevas

■ Mise en place

Les points sont mis en place sur le terrain accompagnés d'une plaquette en aluminium sur laquelle est gravé un identifiant unique.

Au moment de la pose, les métadonnées du point sont enregistrées grâce à un formulaire sur tablette synchronisé avec un serveur de stockage. On y stocke notamment les photos du point,



Figure 5. Un point de canevas équipé de sa plaquette d'identification



une position approchée, un croquis avec des cotes.

■ Un réseau GNSS qui cherche son équilibre

Les composantes planimétriques et altimétriques sont déterminées séparément. La planimétrie est calculée par méthode GNSS statique post-traité, nommée "GNSS multi-stations" dans l'état de l'art donné par [Legros et al., 2013]. L'altimétrie est établie par nivellement direct de précision.

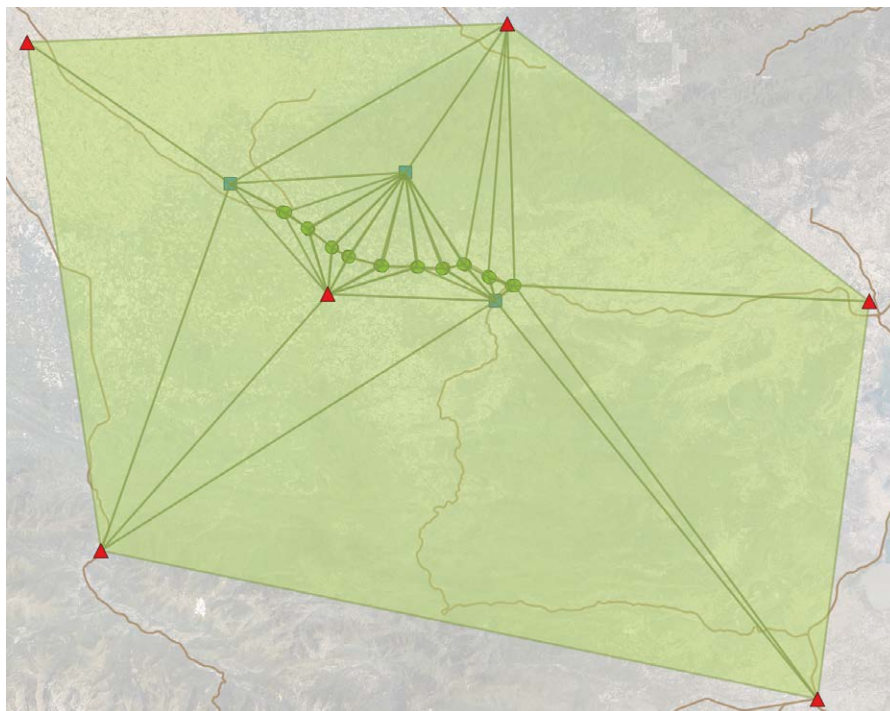
La France métropolitaine est particulièrement bien équipée en matière de sites donnant l'accès au système géodésique national qu'est le RGF93. Via les stations GNSS permanentes du RGP – plus de 400 en France continentale, zone d'intervention de SNCF Réseau – ou via les sites du RBF – plus de 1 000 points publiés avec une précision planimétrique inférieure à 1 cm, on arrive à encadrer la zone de chantier.

Les coordonnées Est et Nord des points du canevas sont déterminées par un calcul GNSS en réseau, c'est-à-dire par le calcul de lignes de base formant un maillage homogène, puis par des phases d'ajustement permettant de lisser les résidus sur l'ensemble des points.

Le réseau est conçu en 3 sous-réseaux :

- le réseau de points de canevas : ce sont les points de SNCF Réseau à calculer ;
- la 1^{re} couronne de points connus et publiés par l'IGN. Ce sous-réseau est constitué des stations RGP et/ou sites RBF encadrant directement le chantier. On les inclut dans le réseau et sont considérés comme points nouveaux, ce qui veut dire qu'ils sont calculés et non fixés. Leur rôle est double : améliorer l'homogénéité du réseau, et fournir un échantillon de points de contrôle, car leurs coordonnées obtenues seront comparées à leurs coordonnées connues ;
- la 2^{de} couronne de points connus et publiés par l'IGN. Ce sous-réseau est constitué des stations RGP encadrant les points de canevas et la 1^{re} couronne. Ils forment l'enveloppe convexe de l'ensemble des points. Ils sont considérés comme fixes en fin de traitement.

Les lignes de base à calculer sont déterminées en effectuant la triangulation de



Canevas Castelnaudary – Carcassonne

Figure 6. Triangulation de Delaunay du réseau

Delaunay de l'ensemble des points des 3 sous-réseaux. Cette triangulation a l'avantage de donner les lignes de base les plus courtes possible et les mieux réparties autour de chaque point. Elle assure également la présence des lignes de bases entre points nouveaux consécutifs.

D'un point de vue graphique, cela fournit en général un réseau avec une "colonne vertébrale" constituée des points nouveaux, contrainte de part et d'autre par la 1^{re} couronne, le tout étant bloqué dans le système RGF93 par la 2^{de} couronne.

Dans le cas d'un canevas situé proche de la frontière, il n'est pas toujours possible d'avoir une 2^{de} couronne formant bien l'enveloppe convexe du réseau. On utilise alors des stations étrangères. Si les réseaux GNSS permanents régionaux mettent rarement leurs données brutes à disposition aussi simplement que le RGP, l'EPN (*Euref Permanent Network*), réseau qui regroupe les stations EUREF et IGS situées sur le territoire européen, rend les fichiers RINEX accessibles sur un serveur FTP. Cependant, une vigilance particulière est nécessaire pour utiliser des coordonnées cohérentes avec le RGF93, c'est-à-dire publiées dans la réalisation ETRF2000. Le RGF93 a été

recalculé dans sa dernière mise à jour à partir de stations connues en ETRF2000 époque 2009.0, tandis que les stations EPN sont publiées en ETRF2000 époque 2005.0. Leur vitesse de déplacement annuelle est publiée, ce qui permet de les exprimer à l'époque 2009.0. Les précisions souhaitées en fin de calcul nous permettent de faire l'approximation $\text{RGF93} = \text{ETRF2000@2009.0}$, ce qui serait probablement réfuté par les géodésiens les plus pointus.

Il faut aussi faire attention au fait que les coordonnées exprimées dans l'en-tête des RINEX des stations EPN ne sont pas les coordonnées publiées, mais bien des coordonnées approchées. Le standard RINEX n'impose effectivement pas de donner des coordonnées précises. En tant qu'utilisateurs assidus du RGP, qui publie dans l'en-tête RINEX les coordonnées publiées, on aurait tendance à l'oublier.

■ Acquisition des données brutes

Les durées d'enregistrement de mesures GNSS statiques sont les suivantes :

- 20 minutes communes pour le calcul du vecteur entre 2 points du même couple ;
- 30 minutes communes entre 2 points de couples consécutifs pour tout autre vecteur, la formule suivante s'applique :



durée de station = 30 min + 1 min par km de ligne de base au-delà de 20 km + 1 min par 100 m de dénivelée.

Sur le terrain, cela se traduit par la tenue de plusieurs sessions d'occupation sur chaque point. Ainsi, on assure l'indépendance linéaire des lignes de base. On évite en effet d'avoir dans le réseau une figure fermée – un triangle ou tout autre polygone – dont tous les côtés sont calculés à partir de la même session d'observations. Ceci est très important pour vraiment bénéficier de la notion de contrôle et de redondance propre aux calculs en réseau.

L'équipe terrain évolue en rotations pour collecter toutes les mesures nécessaires au calcul du réseau. La synchronisation et la navigation des agents est aisée grâce aux applis de messagerie de groupe. Ces applis permettent également de partager la localisation des points de canevas, ce qui est particulièrement pratique pour les agents devant trouver un point qu'ils n'ont pas eux-mêmes installé. La Division ATT est en général composée de 4 personnes, chacune gérant un couple de points. Dans quelques cas, il y a eu jusqu'à 8 opérateurs en simultané, pour un total de 16 récepteurs déployés en même temps – de quoi couvrir de grands linéaires rapidement.

Traitement des observations

Les sessions d'observations des mêmes satellites au même moment de deux points différents permettent de calculer la ligne de base, ou vecteur, entre ces points. Les composantes 3D d'un vecteur correspondent à la différence de coordonnées géocentriques cartésiennes entre les 2 extrémités. Lorsque toutes les lignes de base de la triangulation sont calculées – avec la fixation des ambiguïtés entières *a minima* sur la fréquence *ionofree*, on contrôle leur cohérence par le calcul de fermeture de boucles. Chaque boucle indépendante du réseau est isolée, et la somme de leurs vecteurs est effectuée. Une boucle ferme théoriquement à zéro car le point de départ est aussi celui d'arrivée. La valeur de la fermeture est normalisée en la ramenant à la taille de la boucle, c'est-à-dire à la distance parcourue le long des vecteurs de celle-

Boucle 7

De	A	dX[m]	dY[m]	dZ[m]	Epoque
43200	38940	-2828.1550	1529.0672	2659.8924	09/20/2016 13:33:50
38940	VIEILLEVIGNE	954.1768	-8605.1223	-1101.8093	09/20/2016 12:07:10
VIEILLEVIGNE	43200	1873.9869	7076.0534	-1558.0807	09/20/2016 12:53:30
Est:	-0.0014 m	Test W:	-0.35		
Nord:	-0.0048 m		-0.55		
Altitude:	0.0078 m		0.89		
Erreur de fermeture:	<u>0.0092 m</u>	(0.5 ppm)	Ratio:	(1.2205961)	
Longueur:	20384.3838 m				

Figure 7. Caractéristiques de la fermeture de boucle

ci, ce qui donne une fermeture en ppm. En général on obtient des fermetures planimétriques inférieures à 1 ppm. Une fermeture dépassant les 10 ppm démontre en général la présence d'une ligne de base de mauvaise qualité. Chaque ligne de base se trouvant dans au moins 2 boucles indépendantes, c'est en croisant les informations issues de boucles dégradées qu'on peut retrouver la ligne de base fautive et l'exclure du calcul. Dans ce cas, la surabondance de données issues du terrain et des multiples occupations permet d'avoir accès à une autre session pour ce vecteur, tout en gardant l'indépendance linéaire du réseau.

La validation de cette phase permet d'avoir confiance dans la qualité des mesures. On entre ensuite dans la phase d'ajustement du réseau, avec en 1^{er} lieu l'ajustement libre. Les lignes de base ne sont pas modifiées – les 3 composantes gardent la même valeur – mais sont positionnées de manière à

ce que la somme des écarts au carré de chaque détermination de chaque point avec leur position moyenne soit la plus faible possible. Ceci a pour effet de lisser les résidus sur tout le canevas, et l'expérience montre que les écarts-types en position de chaque point deviennent équivalents à 1-2 mm près.

L'analyse peut aussi être portée sur la forme et l'orientation des ellipses de confiance sur chaque point. On chercherait alors à avoir des ellipses faiblement aplaties et toutes orientées de la même façon. Cette étape validée, c'est ici l'homogénéité du canevas qui est qualifiée. Cette phase permet de s'assurer que le réseau se comporte de la même manière d'un bout à l'autre du canevas. Il reste à passer dans la dimension "absolue" de l'ajustement, à savoir vérifier que le réseau est cohérent avec la réalisation locale du RGF93. Il s'agit dans un 1^{er} temps de l'ajustement à contraintes minimales. On donne ici à un point

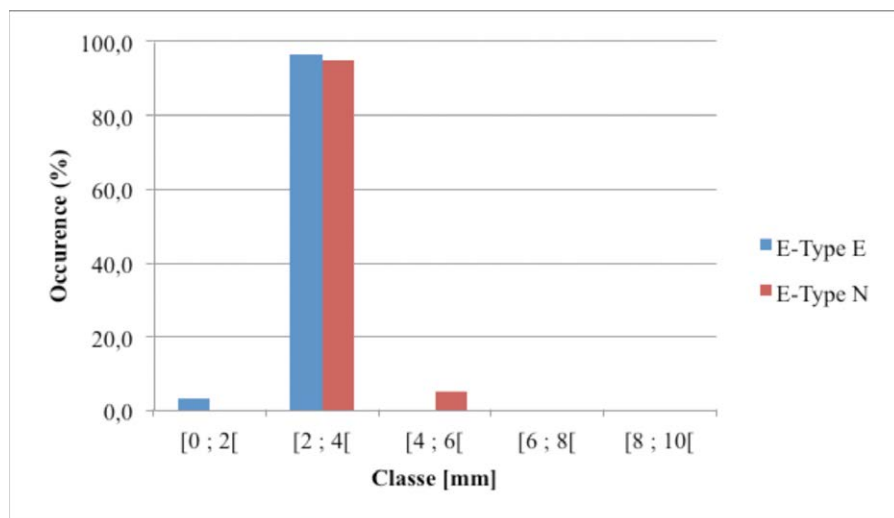


Figure 8. Répartition des écarts-types des points du réseau après ajustement libre



connu dans le RGF93 – typiquement un point de la 2nde couronne car ceux de la 1^{re} ne seront pas fixés – la qualité de point fixe. Cela équivaut à dire que les lignes de base partant de ce point auront pour origine les coordonnées connues de ce point et ne pourront pas être translatées, contrairement aux autres, comme lors de l’ajustement libre. En d’autres termes, il s’agit de répartir les résidus de position du point fixe sur le reste du réseau, et de ce point seulement – les écarts-types des autres points vont donc très peu changer, et surtout de débiter la mise en cohérence du réseau avec le RGF93. L’analyse est réalisée sur les écarts entre les coordonnées calculées de chaque point du RGF93 et leurs coordonnées publiées par l’IGN. Cet écart est généralement inférieur à 15 mm sur chaque composante. Ce seuil est parfois dépassé, soit en cas de mouvement du point connu – cas de bornes géodésiques en zones d’aléas, soit si le point est très éloigné du point fixe, auquel cas celui-ci est calculé par de très longues lignes de base. Un de ces cas pouvant survenir, c’est surtout la tendance globale de tous les points connus qui est observée.

Pour terminer, confiants dans nos mesures, dans l’homogénéité du canevas, et dans sa cohérence locale avec le RGF93, il reste à donner aux autres points connus de la 2nde couronne la qualité de point fixe. Cette étape se

RGP/RBF	Écarts à la position publiée (cm)	
	Est	Nord
ANGL	-0.4	0.7
BOUG	-0.3	1.0
BRE2	0.5	1.1
CARQ	-0.5	1.0
LA BOISSIERE	-0.8	-0.2
LES ESSARTS	-0.1	0.8
LES LANDES	0.0	1.0
MACH	-0.2	0.6
SAGI	-0.2	2.2
TREM	-0.4	1.9
VIEILLEVIGNE	-0.3	0.7

Figure 9. Écarts entre position recalculée et position publiée des points connus, après l’ajustement pré-contraint

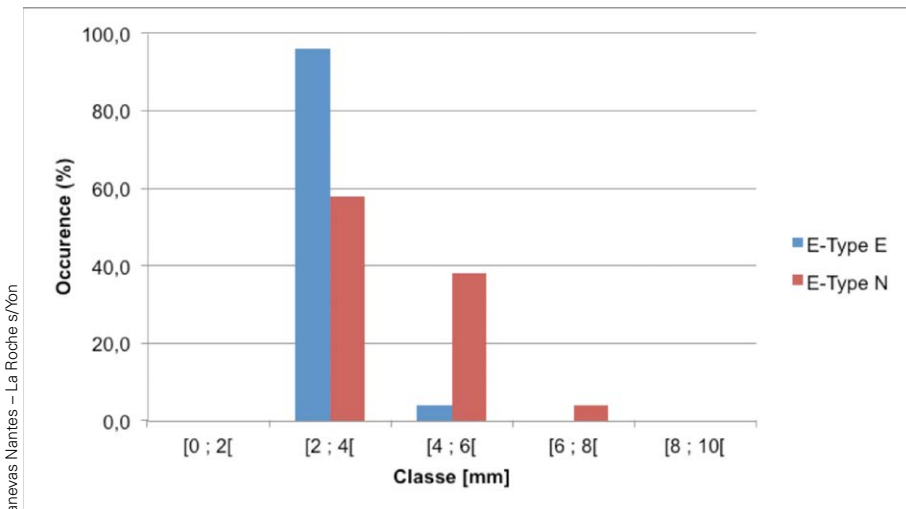


Figure 10. Répartition des écarts-types des points du réseau après ajustement contraint

différencie des autres car elle amène des contraintes dans le réseau. On parle d’ajustement contraint. La figure est déformée de manière à ramener les points connus à leur position vraie. Cela a tendance à augmenter les écarts-types des points calculés car ils “absorbent” les résidus de tous les points nouvellement fixés. L’analyse se porte donc sur ces valeurs et sur leur répartition. En général ils sont groupés autour d’une valeur à 2-3 mm près.

Cette analyse donne une indication sur la précision relative du canevas. Quant à la précision absolue, elle est contrôlée à partir des points de la 1^{re} couronne, en faisant la même comparaison que lors de l’ajustement à contraintes minimales. On vérifie qu’ils sont calculés à moins de 15 mm de leur position connue.

Les coordonnées planimétriques des points nouveaux obtenues après la phase d’ajustement contraint sont celles livrées et publiées. Elles s’expriment dans une projection associée au RGF93, à savoir le Lambert93 ou la

RGP/RBF	Écarts à la position publiée (cm)	
	Est	Nord
LA BOISSIÈRE	-0.6	-0.6
LES ESSARTS	0.0	0.0
LES LANDES	0.1	-0.2
VIEILLEVIGNE	-0.1	-0.4

Figure 11. Écarts entre position recalculée et position publiée des points connus, après l’ajustement contraint

CC 9 zones la plus appropriée pour le chantier, c’est-à-dire celle où l’altération linéaire est la plus faible. L’emploi de coordonnées exprimées en Lambert I, II, III etc. (ancien) dans le référentiel NTF est évidemment proscrit.

■ Un nivellement direct traditionnel

L’altitude de chaque point est déterminée par nivellement direct de précision en cheminement double. Les repères du NGF aux abords du chantier sont utilisés. Suivant les cas, soit l’ensemble des points du canevas est inclus dans un seul et même cheminement, soit chaque couple est rattaché aux repères NGF proches. La stabilité du NGF devant être contrôlée, il y a toujours au moins 2 repères utilisés. Prenons l’exemple du rattachement altimétrique d’un couple dans un canevas pseudo-géodésique. Deux cas de figure s’offrent à nous :

- rattachement par un cheminement encadré seul : le couple de points est inclus entre 2 repères NGF. La fermeture est comparée à la tolérance officielle des cheminements de précision de l’arrêté de 1980, à défaut d’avoir pu mettre en pratique l’arrêté de 2003 sur ce genre de mesures.
- 2 cheminements, un bouclé et un encadré : le cheminement bouclé part d’un repère NGF, inclut le couple de points, puis ferme sur le même repère. La tolérance utilisée ici est basée sur la précision donnée par le constructeur du niveau, car seules les mesures entrent en jeu dans la fermeture. Le



Figure 12. Cas d'un rattachement avec un simple cheminement encadré - les RN en violet, les points de canevas en vert

cheminement encadré, lui, est fait entre le repère NGF utilisé précédemment et un autre. La tolérance est calculée avec la formule décrite ci-dessus.

En cas de cheminement hors tolérance, on vérifie que les deux branches du cheminement double sont homogènes, c'est-à-dire qu'elles présentent un écart de fermeture équivalent, à la précision de mesure près. Si un cheminement encadré est hors tolérance, mais que les 2 branches sont cohérentes, les mesures ne sont pas remises en question, mais plutôt la stabilité du NGF. On poursuit alors les mesures vers un autre repère. Les cheminements sont faits de manière à être nécessairement dans

l'un des deux cas expliqués ci-dessus. Pour les opérations de nivellement, l'équipe de terrain de la division ATT est scindée en 2 équipes de 2 personnes : l'une dédiée aux cheminements en emprises SNCF, sous dispositif de protection ferroviaire, l'autre pour les cheminements pouvant se faire intégralement dans l'espace public.

Lorsque l'ensemble des cheminements couvrant la totalité des points du canevas est effectué et contrôlé, l'altitude obtenue après compensation de l'écart de fermeture est celle retenue. Elle s'exprime dans le système altimétrique légal en France continentale en 2017, à savoir le système NGF - IGN69.

Publication des points

■ SmartTopo®, un portail Web dédié

En fin de traitement, les points, leurs coordonnées et autres attributs sont publiés sur SmartTopo, le portail Web public regroupant l'ensemble des points de canevas principaux mis en place pour le compte de SNCF Réseau depuis 2016 et calculés selon les méthodes expliquées précédemment.

Ce portail, accessible à l'adresse smarttopo.xyz, propose un affichage cartographique de chaque site mis en place. L'utilisateur peut générer les fiches PDF des points ou les extraire en

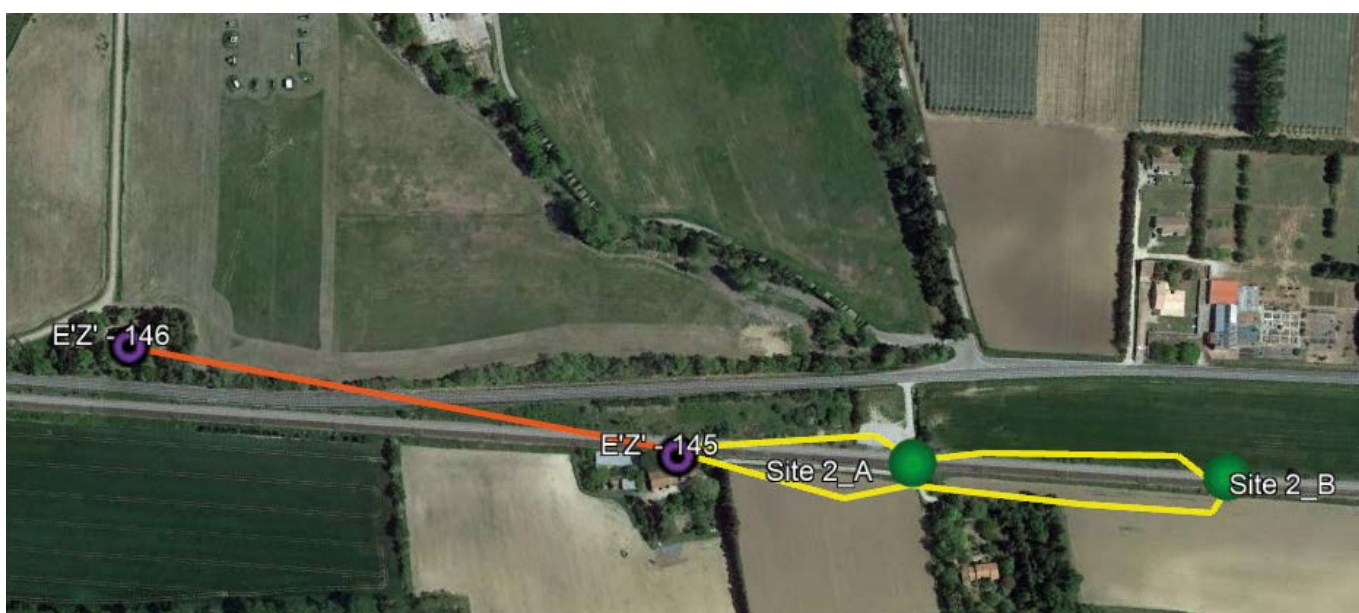


Figure 13. Cas d'un rattachement avec une boucle et un encadré - les RN en violet, les points de canevas en vert

Développement d'une procédure d'amélioration du calcul de trajectographie d'un système de cartographie dynamique

■ Katia MIRANDE

L'entreprise GEOFIT dispose d'une chaîne de traitement efficace pour traiter les données issues de levés effectués grâce à un système de cartographie dynamique. Néanmoins, les trajectoires calculées à partir des informations fournies par la centrale inertielle et le système GNSS embarqués sont parfois inexactes et entraînent un décalage entre le nuage de points généré et la réalité. Afin de mener à bien les expérimentations ayant pour objectif de trouver des éléments d'amélioration du calcul de trajectoire, une procédure de tests a été mise en place. Une méthode de création de trajectoires de références a été définie, cette dernière permet de générer une trajectoire à partir des points de contrôles disponibles sur les sessions de mesures d'intérêt. Des trajectoires ont ensuite été générées et comparées à cette trajectoire de référence. Des paramètres de calculs permettant d'améliorer les trajectoires ont été découverts. De plus, un programme sous Matlab a été créé pour permettre d'optimiser certaines étapes du traitement. La chaîne de traitement a donc été améliorée en termes de vitesse et de résultats.

■ **MOTS-CLÉS**
cartographie dynamique, trajectoire, ambiguïté de phase, navigation

de points obtenu présente des décalages par rapport à la réalité ou ne soit pas cohérent entre plusieurs passages. Ces dossiers nécessitent alors plus de temps humain et de temps sur le terrain (acquisition de données complémentaires) pour l'obtention de données satisfaisantes.

Le bon déroulement d'une mission de cartographie dynamique dépend d'un nombre important d'étapes présentées en figure 1. L'acquisition et le traitement des données sont entièrement réalisés par GEOFIT.

Ce projet se focalise uniquement sur les éléments permettant d'améliorer le calcul de la trajectoire du système d'acquisition lors d'une mission. En effet, le géoréférencement du nuage de points obtenu lors de l'acquisition dépend du bon calcul de la trajectoire adoptée pendant la mission. Il serait

Contexte et objectifs de l'étude

L'entreprise GEOFIT, anciennement FIT ESIC, propose, depuis maintenant plus de 5 ans, la réalisation de relevés à haut rendement par cartographie dynamique. Cette technologie présente la possibilité d'acquérir une quantité très importante de données et constitue donc un réel atout lorsqu'il s'agit de répondre aux besoins des clients.

Néanmoins, le traitement d'une telle quantité de données n'est pas aisé car il peut devenir particulièrement chronophage. Il est donc nécessaire de disposer d'une chaîne de traitements qui soit optimale en matière de temps passé et menant à des données exploitables, c'est-à-dire un nuage de points géoréférencé le plus précisément possible. La chaîne de traitement mise en place chez GEOFIT permet d'ores et déjà d'obtenir un résultat

répondant aux demandes des clients. Malheureusement, il peut arriver que certains dossiers présentent des difficultés supplémentaires et que le nuage

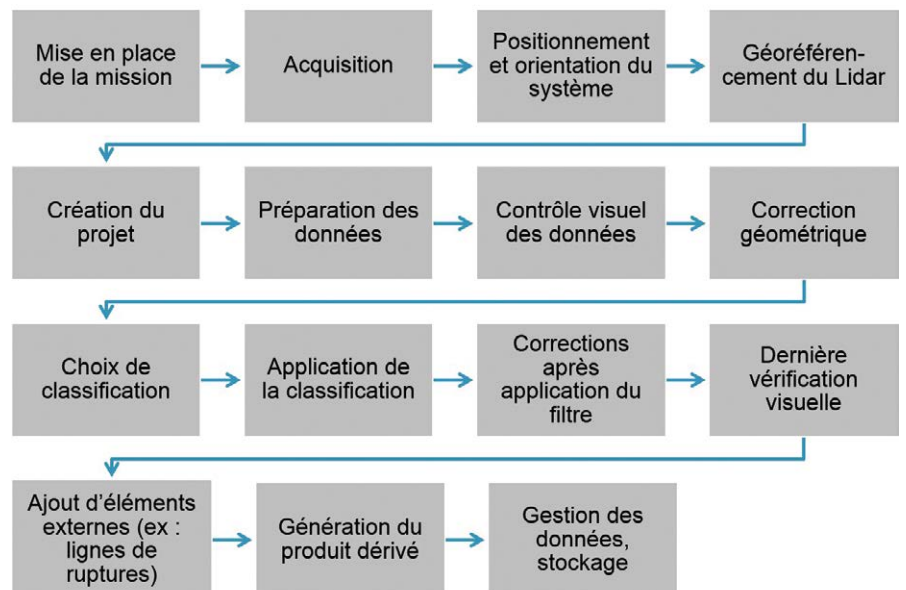


Figure 1. Étapes classiques d'une mission de cartographie dynamique (traduit de Graham (2010)).

ainsi possible de diminuer le traitement effectué à même le nuage de points dans la suite.

Positionnement et orientation du système

Le système de positionnement

Nous nous sommes intéressés ici aux systèmes d'acquisition mobile embarqués sur véhicules. Un système d'acquisition mobile est constitué de deux grands ensembles d'éléments :

- Un système de positionnement ou POS (*Position and Orientation System*) : ce système est composé d'un récepteur GNSS, d'une centrale inertielle ou IMU (*Inertial Measurement Unit*) et d'un système de mesure de distance.
- Un ou plusieurs systèmes d'acquisition de données : il peut s'agir d'un LiDAR et d'une caméra par exemple.

L'emplacement relatif des différents composants d'un système mobile doit être connu de façon précise pour que le géoréférencement des données acquises soit possible. Ces distances entre les différents éléments sont désignées comme étant des bras de levier. La *figure 2* présente les bras de levier présents dans un système d'acquisition mobile embarqué sur un véhicule terrestre. Le vecteur position que l'on souhaite déterminer est le vecteur \mathbf{r}_P^m . Il s'agit du vecteur de coordonnées de P dans le système de coordonnées de la commande (exprimable en mètres). Un certain nombre de vecteurs sont déterminés par la calibration du système. L'ensemble du système est positionné dans un repère défini par la centrale inertielle. L'ensemble des informations nécessaires est ramené dans un référentiel absolu par le biais du récepteur GNSS.

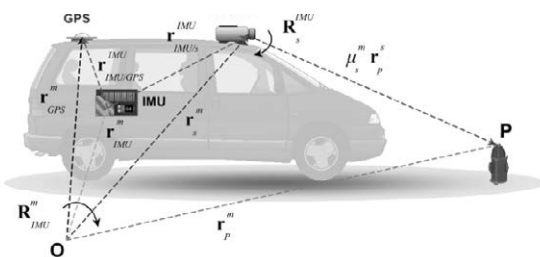


Figure 2. Les différents bras de levier présents dans un système d'acquisition mobile (Graham, (2010)).

Le couplage des données

On a pu noter que le système de positionnement était constitué d'un récepteur GNSS et d'une centrale inertielle. Les données issues de ces deux systèmes sont couplées. Ce couplage de la centrale inertielle avec le GNSS permet de combiner les avantages des deux systèmes. D'une part, on obtient une position absolue, de précision indépendante du temps par le système GNSS. D'autre part, on obtient une acquisition à haute fréquence, autonome et indépendante, grâce à la centrale inertielle. Le couplage permet d'obtenir une trajectoire disposant de points à la même fréquence que la centrale inertielle, sans le défaut de dérive en précision dans le temps de celle-ci. Plusieurs stratégies de couplage entre les deux systèmes de positionnement existent. On en distingue deux principales :

- Le couplage lâche (*figure 3*) : le système GNSS calcule à partir de ses propres données (pseudo-distances et mesures de vitesse Doppler) et fournit une position et une vitesse. Parallèlement, les données de la centrale inertielle sont calculées (accélérations et attitude) et nous donnent une position et une vitesse. Les deux solutions de positionnement sont donc calculées séparément puis comparées. La solution issue des mesures de la centrale inertielle est alors corrigée grâce à la solution GNSS. Cette solution de couplage présente l'intérêt de rester relativement simple. Dans ce couplage, la solution GNSS a été calculée, par conséquent, les erreurs de mesures accidentelles ont pu être filtrées en partie.
- Le couplage serré : le couplage est appliqué directement aux mesures

brutes et non pas aux solutions issues des deux systèmes de calcul respectifs. On considère les pseudo-distances et les pseudo-vitesses extraites en amont par le récepteur GNSS. Les mesures de la centrale inertielle sont utilisées pour estimer les mesures brutes acquises par GNSS. Les mesures GNSS ainsi que les mesures de la centrale inertielle sont corrigées lors de ce couplage.

Le couplage serré est considéré comme meilleur dans des environnements urbains puisqu'il ne nécessite la présence que de 4 satellites pour corriger les mesures de la centrale inertielle quand le couplage lâche en demande au minimum 7. Néanmoins, les mesures inertielles seront corrigées grâce aux mesures GNSS. Le couplage serré pose donc problème lorsque des erreurs grossières sont présentes dans ces mesures GNSS. Le couplage lâche présente l'avantage de considérer la solution GNSS déjà calculée et donc exemptée d'erreurs grossières. C'est ce couplage qui est utilisé dans la chaîne de traitement étudiée.

La création d'une référence

Avant d'effectuer tout test ou toute tentative d'amélioration du calcul de trajectoire, la question de l'évaluation de cette dernière se pose.

En effet, les décalages ou erreurs dus à la trajectoire sont très simplement visibles dans le nuage de points généré. Malheureusement, la génération du nuage de points est une étape chronophage et limiterait le nombre de tests possibles. De plus, la détection des erreurs dans le nuage de points doit

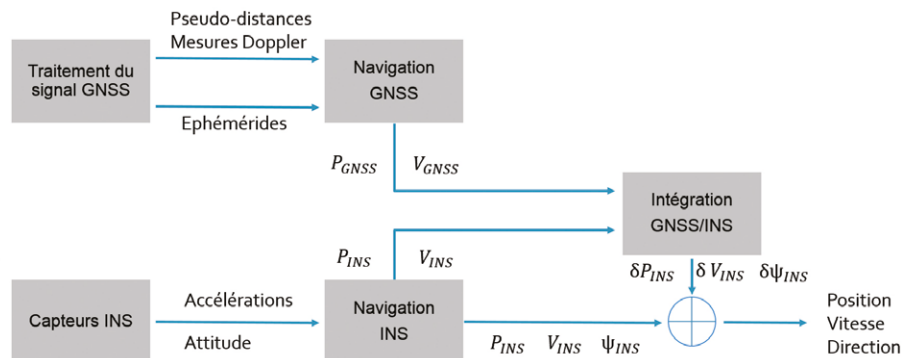


Figure 3. L'intégration des données de la centrale inertielle et des données GNSS, lâche. (traduit et réalisé à partir de Spangenberg (2009)).

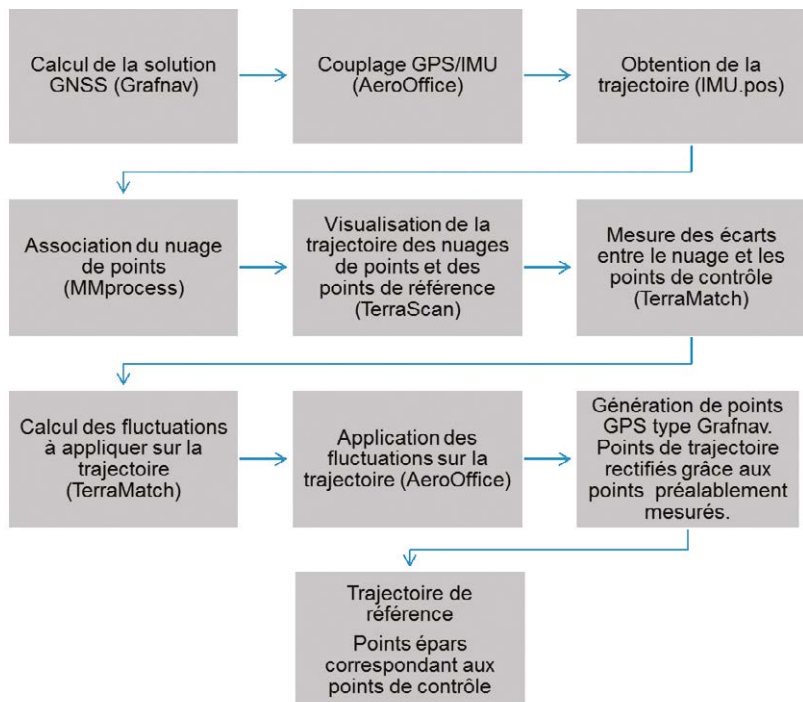


Figure 4. Étapes nécessaires à la réalisation d'une trajectoire de référence constituée de positions éparses.

par la suite se faire de façon manuelle, en mesurant les écarts constatés entre plusieurs passages du système d'acquisition dans la même rue ou zone. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer une trajectoire sans générer le nuage de points LiDAR associé.

Certes, il est possible de juger d'une trajectoire de façon relative par rapport à plusieurs passages du système d'acquisition sur la même zone. Néanmoins, une évaluation par rapport à une référence extérieure est préférable et ne serait pas corrélée, or certains projets de cartographie dynamique se trouvent complétés des acquisitions par méthode traditionnelle (tachéomètre...). Ces points servent alors de points de contrôles ou de compléments. Dans le cadre de ce projet, ces points vont être exploités pour permettre l'obtention de points de référence. Cependant, une question se pose : comment exploiter ces points directement après la génération de la trajectoire ?

■ Méthode

Un procédé, illustré en *figure 4*, a été développé pour permettre d'utiliser ces points de contrôle directement après le couplage de la solution GNSS avec la centrale inertielle. Ce procédé démarre par l'utilisation des mêmes étapes que la chaîne de traitement et

utilise les logiciels présents dans la chaîne de traitement. Dans un premier temps, il s'agit de calculer la trajectoire d'une session de mesure et de géoréférencer le nuage de points associé. On visualise ensuite la trajectoire avec le nuage de points. Il est alors possible de mesurer des écarts entre le nuage et les points de contrôle. Ces écarts vont être convertis en "fluctuations". On obtient la rectification à appliquer à la trajectoire à un instant précis pour que celle-ci génère un nuage de points cohérent avec l'emplacement du point de contrôle mesuré. Ces fluctuations sont appliquées à la trajectoire et permettent l'obtention de points épars correspondant à une trajectoire de référence en adéquation avec les points de contrôle.

■ Résultat

La *figure 5* permet de visualiser des points de référence créés à partir d'un point de contrôle. Le point de contrôle est représenté en bleu clair. Il peut être considéré comme un contrôle vertical car la chaussée ne présente pas d'irrégularités à cet emplacement. Mais il peut également être un contrôle horizontal puisqu'il est associé au coin d'une bande du passage clouté. La trajectoire adoptée par le véhicule est représentée en vert. Deux points sont

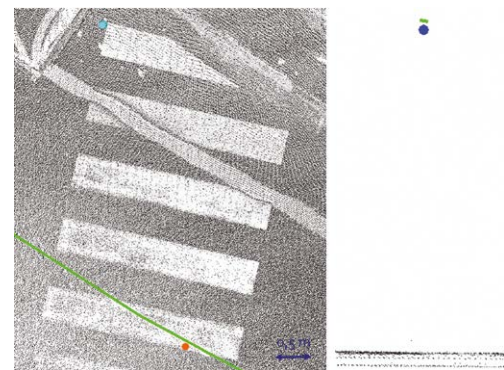


Figure 5. Vue de dessus et en coupe d'un nuage de points, de la trajectoire et des références.

générés grâce au processus décrit précédemment. Le point de couleur orange est le point de référence en planimétrie généré. Il s'agit de l'emplacement que devrait emprunter la trajectoire pour que le nuage de points soit géoréférencé de façon à ce que le point de contrôle (bleu) se trouve parfaitement à l'angle de la bande blanche. De la même façon, on obtient une référence verticale représentée par le point de couleur bleue sur la vue en coupe.

■ Exploitation

Un script Matlab permet, par la suite, d'exploiter cette trajectoire. La trajectoire créée est une suite de positions dont la fréquence dépend entièrement de la quantité de points GNSS disponibles pour la session de mesure associée. Cette trajectoire de référence doit être comparée à la trajectoire obtenue après couplage avec la centrale inertielle. Dans le cas présent, la trajectoire est donnée avec une fréquence très élevée. L'acquisition GNSS est effectuée avec une fréquence de 2 Hz mais est couplée avec la centrale inertielle qui effectue son acquisition à une fréquence de 500 Hz, soit 0.002 seconde entre deux positions adoptées lors de l'acquisition. Une interpolation a donc été effectuée mais cette dernière n'impacte pas les résultats puisqu'elle est minimale. Cette interpolation étant systématiquement effectuée sur un intervalle de temps inférieur à 0.002 seconde (temps entre deux mesures de la centrale inertielle), l'erreur due à cette interpolation ne peut excéder, à 100 km/h, 5 centimètres. De plus, nous sommes plus souvent amenés à travailler sur des missions en milieu urbain (plus susceptibles de contenir



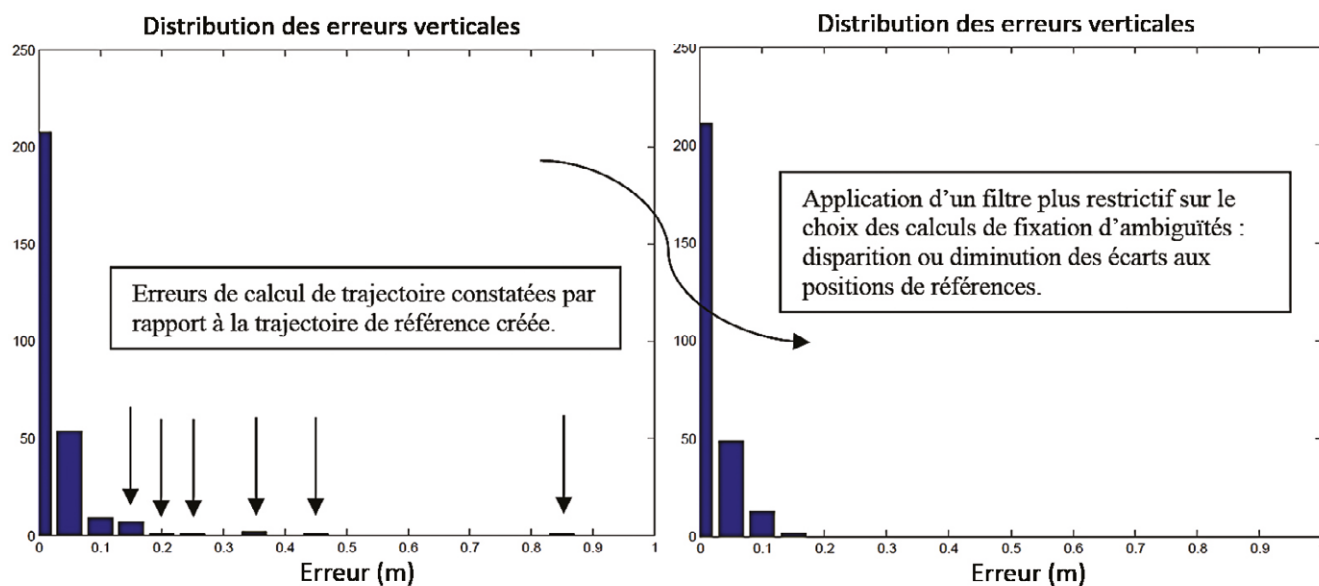


Figure 6. Histogrammes représentant les écarts aux positions de référence par rapport aux trajectoires testées. À gauche, la trajectoire est calculée selon la méthode originelle de traitement. À droite, la trajectoire a été calculée en filtrant un certain nombre de fixations d'ambiguïtés erronées.



des erreurs), entre 30 et 50 km/h de vitesse de déplacement du système d'acquisition.

Une chaîne de tests a donc été mise en place de façon à pouvoir évaluer une trajectoire par rapport à une référence indépendante. Néanmoins, il est impossible avec cette méthode d'évaluer la solution GNSS avant couplage par rapport à la trajectoire de référence. En effet, l'interpolation devrait alors être effectuée sur une période de temps trop importante, l'erreur due à celle-ci serait bien trop conséquente.

Amélioration de la solution GNSS

■ Ajout d'une étape

Le logiciel de traitement GNSS (GraphNav) de la chaîne de traitement propose un nombre important de graphiques permettant d'analyser les calculs et les données à disposition. Parmi tous les graphiques qui n'étaient pas utilisés dans la chaîne de traitement initiale, nous sommes parvenus à prouver l'intérêt de certains. Nous avons exploité un graphique présentant les différences de position planimétriques et de hauteur entre deux solutions GNSS produites. Il s'agit par défaut d'une différence entre un calcul aller et un calcul retour. Ce graphique permet notamment d'évaluer la qualité des fixations d'ambiguïtés sur les deux

solutions GNSS (aller et retour) calculées. Or, les parties de ce graphique qui présentent de fortes différences sur un temps important, constituant visuellement ce que l'on peut appeler un "plateau", engendrent généralement des erreurs dans le nuage de points généré. Ce graphique permettant de repérer les fixations d'ambiguïté provoquant ces fortes différences, la suite du projet s'est donc focalisée sur la recherche d'options afin de supprimer ces mauvaises fixations d'ambiguïtés.

■ Filtre et résultats

Les tests se sont portés sur les paramètres de calcul de fixation de phase, plus particulièrement sur les conditions de conservation de ces solutions. Les options manipulées lors de cette étape doivent rester compréhensibles et les seuils doivent pouvoir être simplement déterminés grâce au graphique précédent. Afin de représenter l'évolution des écarts de la trajectoire calculée à la trajectoire de référence à l'échelle de toute une session de mesure, ces décalages sont présentés sous forme d'histogrammes.

La figure 6 présente la diminution des écarts de plus de 10 centimètres grâce à l'application d'un filtre plus restrictif. Les histogrammes sont similaires. Cela n'est pas étonnant, la chaîne de traitement a déjà fait ses preuves. Néanmoins, il est bon de rappeler que la trajectoire évaluée est comparée à une

trajectoire de référence plus éparse. Par conséquent, un seul écart sur cet histogramme peut représenter des écarts sur plusieurs mètres d'acquisition. Le bénéfice obtenu n'est pas négligeable. Néanmoins, on note que l'utilisation d'un filtre trop restrictif détériore les résultats dans le cas où le signal GNSS n'est pas de bonne qualité et donc, lorsque la quantité de calculs de fixation d'ambiguïté est limitée. Le filtre appliqué et sa valeur restent donc entièrement dépendants de la session de mesure traitée.

Amélioration du couplage

■ Etude du calcul

L'opération du couplage des données GNSS et de la centrale inertielle est une opération sur laquelle l'utilisateur a un nombre de possibilités d'intervention réduites dans cette chaîne de traitement. C'est pourquoi un certain nombre de tests ont été réalisés dans le but de mieux comprendre cette étape de l'obtention d'une trajectoire mais également de l'optimiser au mieux.

■ Absence de données GNSS

La solution GNSS fournit une position toutes les 0.5 secondes, mais nous avons étudié le cas où la solution GNSS serait absente sur une durée plus importante pour observer les écarts induits par la centrale inertielle. Les tests ont été réalisés dans un cas idéal, celui d'un levé linéaire d'autoroute. Ce cas



Figure 7. Écarts en planimétrie constatés entre la trajectoire initialement calculée et la trajectoire disposant d'importantes zones sans données GNSS.

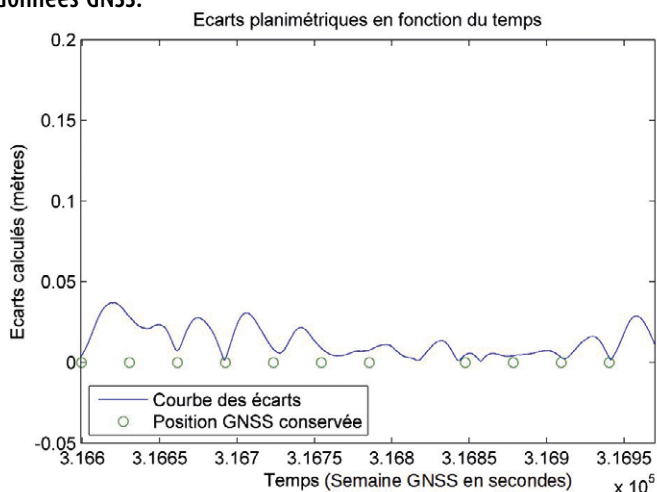


Figure 7.1. Absence de points GNSS d'une durée de 30 secondes.

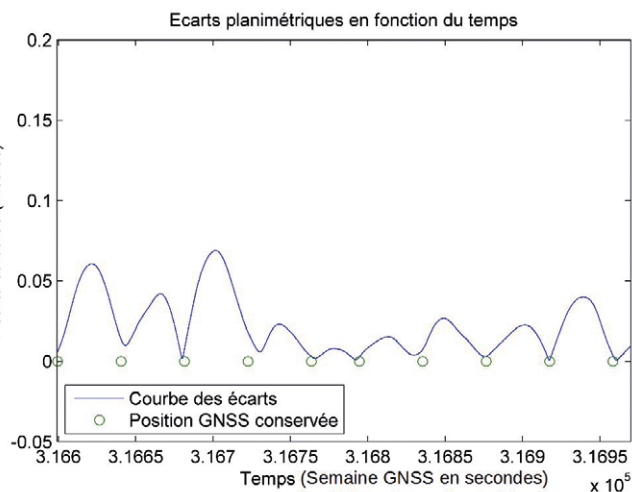


Figure 7.2. Absence de points GNSS d'une durée de 40 secondes.

présente l'avantage de fournir le plus souvent une excellente solution GNSS et une dérive de la centrale inertielle moindre puisque le système n'effectue aucun virage pouvant altérer les mesures. Grâce à ce choix de données, la trajectoire de référence est donc la trajectoire calculée à l'origine puisque cette dernière fournit déjà des résultats exploitables et en adéquation avec les points de contrôle. Les graphiques de la *figure 7* présentent donc la comparaison de la trajectoire de référence avec la trajectoire dont on a supprimé des parties de solution GNSS. Ces graphiques permettent de bien observer l'initialisation de la centrale inertielle sur les points GNSS. En effet, les écarts tendent vers 0 aux temps auxquels les positions GNSS sont renseignées. Les écarts augmentent, comme prévu, avec la durée d'absence de points GNSS. Néanmoins, il n'est pas possible d'observer un systématisme dans les biais observés et induits par la centrale inertielle. On constate donc que dans des conditions idéales (excellent GNSS et trajet linéaire), il faudra une absence de plus de 40 secondes pour que l'erreur sur la trajectoire dépasse 5 centimètres.

■ Seuil de cohérence

Lors du couplage, il est possible de définir un seuil pour lequel les positions de la solution GNSS ne seront pas prises en compte. Ce seuil est défini à partir d'un graphique fourni par le logiciel de couplage, présentant la différence entre la prédiction de la position obtenue

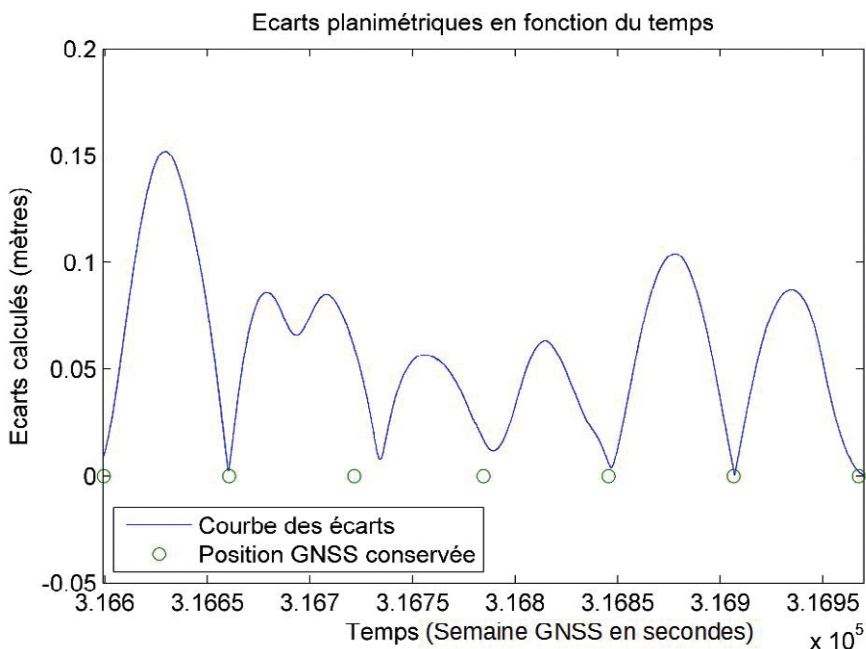


Figure 7.3. Absence de points GNSS d'une durée de 60 secondes.

nue avec la centrale inertielle et la position GNSS donnée pour chaque mesure GNSS. Ce graphique est généré uniquement à partir d'un calcul "aller". Il ne reflète en aucun cas les corrections qui seront appliquées lors du couplage. Des tests ont été réalisés pour constater l'amélioration ou la détérioration de la trajectoire selon la sévérité du seuil. Finalement, le seuil jusqu'à maintenant utilisé a été conservé. L'utilisation d'un seuil plus sévère demanderait une analyse plus fine du graphique précédent pour limiter des absences de solution GNSS trop importantes dans le calcul.

Automatisation d'une partie du traitement

Lors du couplage de la solution GNSS avec la centrale inertielle sous le logiciel AeroOffice, l'utilisateur est amené à préciser certains éléments. L'utilisateur précise notamment quelles sont les zones de non-déplacement du système d'acquisition, les "ZUPT" (*Zero Velocity Updates*) et également les zones disposant d'un signal GNSS qu'il vaut mieux ne pas prendre en compte dans le couplage, les zones "No GNSS". Dans ce cas, seules les informations de position fournies par la centrale inertielle



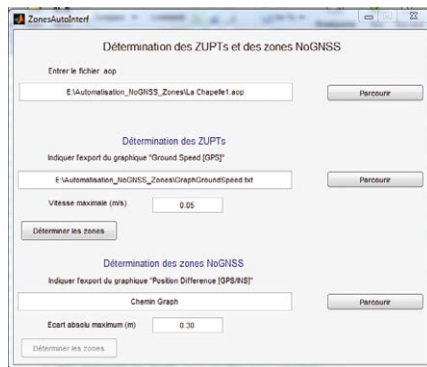


Figure 8. Interface graphique du programme réalisé sous Matlab.



sont utilisées pour déterminer la trajectoire. Les "ZUPT" sont déterminées à partir d'un graphique donnant la vitesse en fonction du temps d'acquisition. Ce graphique est obtenu à partir de la solution GNSS précédemment calculée. Les zones "No GNSS" sont déterminées grâce à un graphique représentant les écarts entre une estimation de la solution proposée par la centrale inertielle et la solution proposée grâce aux observations GNSS en fonction du temps. Si ces écarts dépassent un certain seuil, la solution GNSS n'est pas prise en compte. La détermination de ces zones est particulièrement chronophage. En effet, il est nécessaire de faire défiler en longueur chacun des deux graphiques de contrôle et d'ajuster sa fenêtre de vue à la zone que l'on veut signaler. Cela demande d'agrandir et de diminuer sans cesse les échelles du graphique.

Après avoir découvert qu'il était possible d'exporter ces graphiques d'analyse sous la forme d'un fichier texte, il a été possible de créer un script Matlab permettant la détermination de ces zones et de les réimporter directement dans le logiciel en modifiant directement le fichier de travail d'AeroOffice qui est un fichier texte. Une interface graphique, présentée en *figure 8*, a été réalisée pour plus de confort pour l'utilisateur. Les paramètres de sélection des zones peuvent être modifiés. Des sécurités ont été mises en place. L'utilisateur est obligé de déterminer les zones dans le bon ordre de traitement (sinon les boutons restent grisés). Si le fichier de travail AeroOffice contient déjà des zones, l'utilisateur ne peut pas poursuivre et reçoit un message l'invitant à les supprimer ou à les conserver. Le programme s'inscrit dans la même

logique de traitement que la chaîne de traitement initiale. C'est l'analyse des graphiques qui est ici automatisée.

Le gain de temps est important puisque la détermination de ces zones, dans le cas où elles ne demandent pas d'analyse particulière, varie selon les sessions de mesures de 20 à 40 minutes, voire même une heure pour des sessions très longues. Ce programme permet de limiter l'opération à 5 minutes. Il est ensuite possible de se consacrer à l'analyse et à l'amélioration des zones sans GNSS qui demandent un traitement plus approfondi.

Conclusion

Ce projet a permis l'amélioration de la solution GNSS obtenue par l'ajout d'un traitement et de l'étude d'un graphique supplémentaire. Les erreurs dues à une mauvaise fixation d'ambiguïté sont à présent prises en compte dans cette chaîne de traitement et autant que possible, éliminées. Lors du couplage avec les données de la centrale inertielle, l'utilisateur dispose d'une meilleure compréhension du processus grâce aux travaux préliminaires, mais également de plus de temps d'analyse. En effet, une partie de ce traitement ayant été automatisé, du temps est libéré pour effectuer des analyses plus fines. On élimine également les erreurs dues à l'opérateur lors de ce traitement.

Enfin, on notera que l'ensemble des traitements effectués sont appliqués de façon globale à l'ensemble d'une session de mesure. Or, lors d'une même session de mesure, l'environnement peut être très différent et donc les données du système d'acquisition vont être de qualité variable. On peut, par exemple, effectuer une partie de la session dans une zone très dégagée et linéaire puis la poursuivre dans une ville dense en effectuant de nombreux virages. Il pourrait donc être intéressant de segmenter la session de mesure afin d'appliquer des paramètres de calcul différents selon la nature de ces zones. ●

NDLR : Le PFE chez GEOFIT étant confidentiel, certains détails ne sont pas cités dans l'article.

Contacts

Katia MIRANDE
katia.mirande@laposte.net
Directeur de PFE : Valentin Poitevin
Correcteur : Pierre Grussenmeyer

Bibliographie

- Alshawa, M. (2010). *Contribution à la cartographie mobile : développement et caractérisation d'un système basé sur un scanner laser terrestre*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Strasbourg.
- Ellum, C. et El-Sheimy, N. (2002). *Land-based mobile mapping systems*. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68(1):13-17.
- Graham, L. (2010). *Mobile mappingsystemsoverview*. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 76(3):222-228.
- King, A. (1998). *Inertial navigation-forty years of evolution*. *GEC review*, 13(3):140-149.
- Lahaye, R. et Ladet, S. (2014). *Les principes du positionnement par satellite : Gnss*. Le Cahier des Techniques de l'INRA, pages 9-18.
- Rizos, C. (1997). *Principles and practice of GPS surveying*. University of New South Wales.
- Spangenberg, M. (2009). *Safe navigation for vehicles*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

ABSTRACT

Keywords: mobile mapping, trajectory, phase ambiguity, navigation

The GEOFIT firm has an effective processing chain to process data resulting from mobile mapping surveys. However, the trajectories calculated with the information provided by the inertial measurement unit and the GNSS system are sometimes inaccurate and involve a shift between the generated point cloud and reality. A method of creation of reference trajectories was defined. This method allows to generate a trajectory from the available control points in the measuring run used. Then, trajectories were generated and compared with this reference trajectory. Parameters of calculations improving trajectories were discovered. Besides, a Matlab program was developed to optimize some stages in the process. The processing chain was therefore improved in terms of speed and results.

Méthode de comparaison de nuages de points acquis par scanner laser mobile pour caractériser les éboulements des falaises côtières

■ Baptiste FELDMANN - Clara LÉVY - Thomas DEWEZ - Nathalie MARÇOT

La comparaison diachronique de nuages de points LiDAR a permis d'estimer l'aléa éboulement pour de nombreuses falaises alpines. L'acquisition de données adéquates pour des falaises côtières est plus ardue car la position idéale pour des mesures TLS (Terrestrial Laser Scanning) ou le pilotage d'un drone est située dans la zone submersible.

L'acquisition de données LiDAR depuis un bateau avait donc été testée lors du projet VALSE (2011 - 2015), montrant les difficultés de traitement de ces données (Giuliano, 2015). Cette étude vient compléter les travaux existants en proposant une méthode de comparaison de levés LiDAR avec un point de vue vecteur (c'est-à-dire, sans rastérisation des données), élaborée en utilisant l'algorithme M3C2 (Lague et al, 2013). Les distances entre nuages, qualifiées statistiquement, servent à cartographier les zones d'érosion, ainsi qu'à déduire la forme des blocs éboulés par regroupement des points appartenant à ces zones.

MOTS-CLÉS

Suivi temporel, falaise, risque éboulement, LiDAR, laser-scanner mobile

vecteur (c'est-à-dire sans passer par une rastérisation des données LiDAR) qui a été élaborée en utilisant l'algorithme M3C2 (Lague et al, 2013). Malgré un filtrage de la végétation par orthophotos (Giuliano, 2015), des résidus de végétation non filtrés induisent des différences nuage à nuage suspectes qui ont rendu nécessaire l'ajout d'un processus d'analyse des indicateurs statistiques de la géométrie des blocs (similaire à ceux de la méthode CANUPO de Brodu et Lague, 2012) afin de distinguer les faux positifs.

Contexte d'étude

La base de données LiDAR acquise sur la falaise de Carry-le-Rouet a été produite à partir de 3 levés par MLS (*Mobile Laser Scanning*) embarqué sur un bateau. La topographie complexe du site avec une falaise sinueuse ainsi que le faible marnage en Méditerranée n'ont pas permis d'envisager une numérisation par voie aérienne ou par voie terrestre à l'aide d'un TLS (*Terrestrial Laser*

Introduction

Les éboulements provoquent régulièrement la destruction d'ouvrages situés en tête de falaise et exposent les usagers à un risque important. Les falaises bordant la Méditerranée en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) ont un taux d'érosion annuel moyen, voire faible (quelques mm à cm/an ; Giuliano, 2015). Malgré cela, les falaises côtières de Carry-Le-Rouet avaient été identifiées comme particulièrement à risque, pas tant à cause d'un aléa éboulement élevé, mais plutôt d'une urbanisation importante à proximité de la tête de falaise (Marçot, 2006). Dans l'objectif de pouvoir quantifier précisément l'aléa éboulement à Carry-le-Rouet, le suivi topographique de 3,5 km de côte découpés en 4 linéaires avec un LiDAR mobile installé sur un bateau avait été entamé dès février 2011, puis répété en novembre 2011 et en juillet 2012 (voir la figure 1 pour la localisation).

L'objectif de ce projet de fin d'études fait au BRGM est donc de réaliser, à partir d'une série de mesure LiDAR, une comparaison de l'évolution du trait de côte afin d'identifier les zones de départ de chutes de blocs et de modéliser les cicatrices d'érosion en 3D. Une nouvelle méthodologie de comparaison diachronique est développée ici, à partir des levés LiDAR avec un point de vue



Figure 1. Localisation des levés effectués depuis un bateau sur le site de Carry-le-Rouet (13). D'après Giuliano (2015).

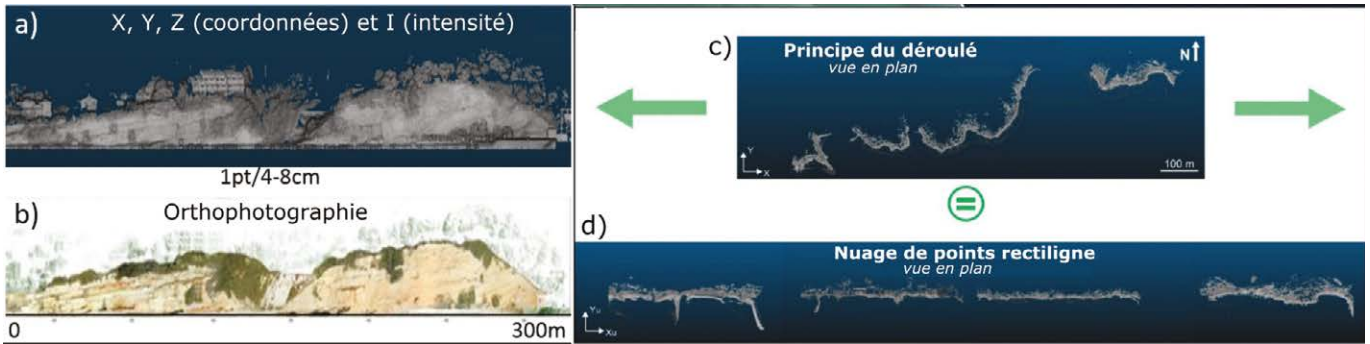


Figure 2. (a) Données LiDAR d'une portion de falaise vue de face avec (b) l'ortho-photo correspondante. Principe du déroulé des données LiDAR selon la géométrie du trait de côte, vue planaire de l'ensemble des linéaires avant (c) et après (d) le déroulé. D'après Giuliano (2015).



Scanning). C'est donc une numérisation par MLS embarqué qui a été préférée. Cette solution permet d'effectuer un relevé dynamique avec une certaine rapidité et efficacité. Néanmoins, l'acquisition des données ayant été réalisée par deux prestataires distincts, les nuages de points obtenus ont des densités différentes. Ainsi, les distances au 1^{er} voisin au quantile 67 % sont d'environ 7,2 cm pour la première époque de levé (février 2011), 5,6 cm pour la deuxième époque de levé (novembre 2011) et 3,4 cm pour la troisième époque (juillet 2012). Ces différences de densité devront être prises en compte dans les comparaisons diachroniques afin de réaliser des calculs qui soient cohérents entre eux. Par ailleurs, ces données avaient déjà fait l'objet d'un pré-traitement important par J. Giuliano en 2015, qui a permis de filtrer la végétation par ortho-photos et de réaliser le déroulé géométrique des nuages de points selon des arcs de cercle et des segments rectilignes qui reproduisent le tracé sinueux du trait de côte (figure 2).

De plus, les données LiDAR de Carry-le-Rouet avaient déjà été comparées entre elles en passant par un modèle numérique de surface en format grille 2,5D (Giuliano, 2015 ; Prémaillon, 2014). Cette méthode de rasterisation facilite les calculs mais ne permet pas une modélisation fine et réaliste des cicatrices d'érosion. Ainsi, les travaux de J. Giuliano (2015) et M. Prémaillon (2014) ont révélé que les répartitions des points dans les 3 nuages LiDAR ne sont pas homogènes. La grille 2,5D ainsi construite possède donc des pixels qui ne contiennent pas de points et donc pas d'information sur le recul de la falaise. Ceci aura pour conséquence d'avoir

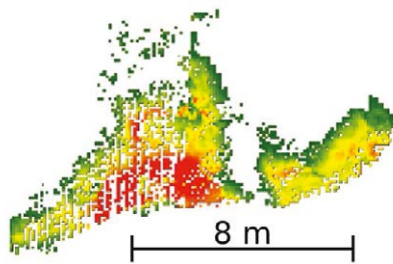


Figure 3. Exemple d'un bloc érodé sur le linéaire 4, éclaté en une multitude de sous-cicatrices, d'après Prémaillon (2014)

des cicatrices d'érosion éclatées en une multitude de sous-cicatrices (figure 3). Ce phénomène va alors fausser l'estimation probabiliste de l'aléa éboulement et rendre difficile l'étude des mécanismes d'érosion.

Chaîne de traitement

Dans la méthode proposée ici, les comparaisons entre les nuages LiDAR de Carry-le-Rouet ne seront pas effectuées à l'aide d'une grille 2,5D, mais par comparaison de nuage à nuage en 3D. Cette analyse vectorielle qui permet d'avoir une meilleure modélisation des blocs, s'appuie sur l'algorithme M3C2, pour *Multiscale Model to Model Cloud*

Comparison (Lague et al., 2013) plugin de CloudCompare (EDF R&D).

Dans les paragraphes suivants, la méthodologie employée est décrite par 1) le processus d'analyse des données qui a permis de sélectionner les valeurs des paramètres de cet algorithme de façon objective, 2) les estimations de distances entre nuages qui sont qualifiées statistiquement et servent à cartographier les zones d'érosion, 3) la forme des blocs érodés qui est déduite des zones d'érosion par une méthode de regroupement des points des nuages LiDAR constituant les faces avant et arrière des blocs. A chacun de ces blocs, il est associé une estimation de l'erreur de cubage afin d'affiner la quantification d'un taux d'érosion annuel moyen et d'une relation volume éboulé / fréquence d'occurrence.

■ Méthode de comparaison de nuage à nuage

Afin d'obtenir une cartographie des zones de départ des chutes de blocs sur la falaise, il a fallu effectuer 3 comparaisons entre les nuages de points des 3 époques de levés LiDAR. L'algorithme de comparaison utilisé, M3C2, fonctionne sur le principe de *core-points* qui correspondent au nuage réf-

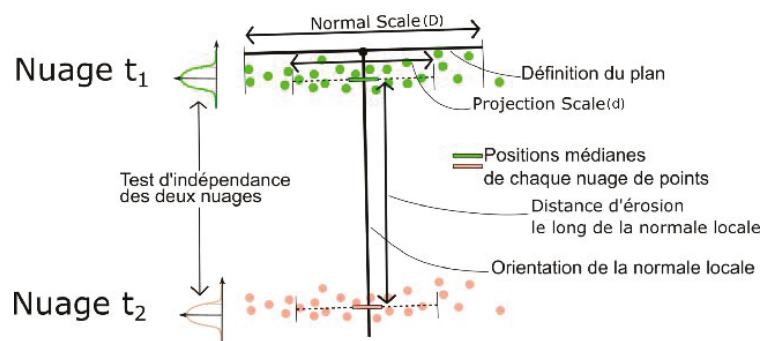


Figure 4. Schéma du principe de fonctionnement de l'algorithme M3C2, d'après Lague et al. (2013).

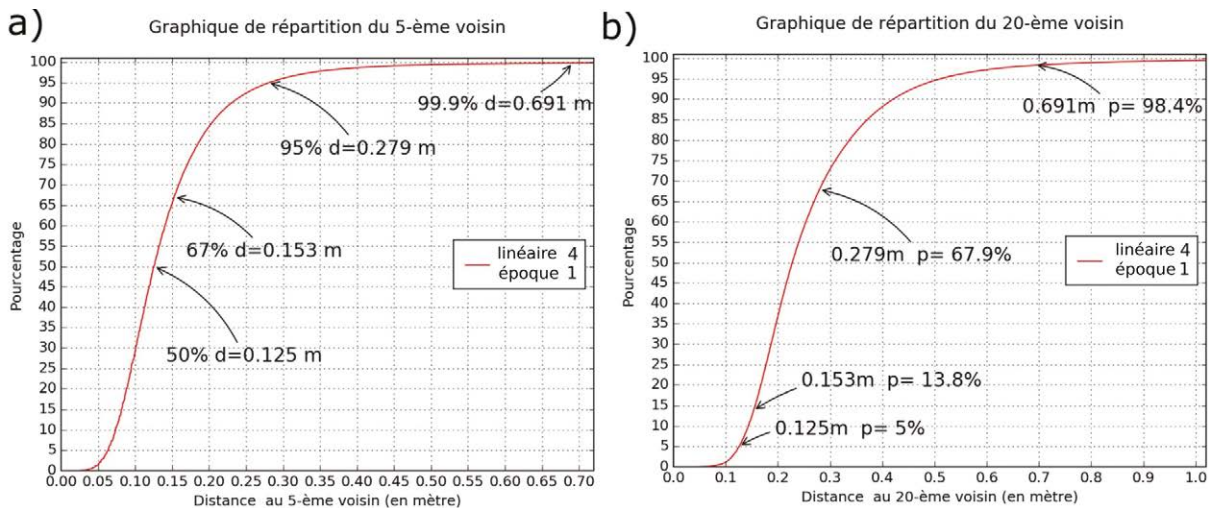


Figure 5. Analyse des distances aux plus proches voisins.

rence sous-échantillonné pour avoir une répartition des points qui soit uniforme. Comme le montre la *figure 4*, sur chaque core-point, la distance de nuage à nuage va être calculée entre les deux positions médianes des deux nuages le long de la normale locale. Cette normale sera définie à partir du plan estimé par les points contenus dans une sphère de diamètre D que l'on nomme "Normal Scale" et dont le centre correspond à chaque core-point. Les positions médianes sont définies à partir des points contenus dans un cylindre (orienté selon la normale précédemment calculée) de diamètre d que l'on nomme "Projection Scale" et centré sur chaque core-point.

Le choix des deux paramètres *Normal Scale* et *Projection Scale* est donc essentiel pour le bon déroulement des comparaisons. Dans le but de fixer de façon objective leurs valeurs, nous avons procédé à une analyse fine des caractéristiques des nuages de points. L'un des avantages de l'algorithme M3C2 est qu'il réalise un calcul d'indépendance sur les deux nuages de points, afin d'estimer si la distance calculée est significative d'un point de vue statistique et correspond donc bien à une réalité physique. Pour estimer cet intervalle de confiance, l'algorithme a besoin d'un minimum de 5 points contenus dans le cylindre de la *Projection Scale*. De plus, les chercheurs ayant développé M3C2 préconisent environ une vingtaine de points dans ce cylindre afin d'avoir un calcul d'intervalle de confiance qui soit robuste.

Pour estimer la valeur de la *Projection Scale*, nous nous sommes donc appuyés sur la répartition des distances au 5^e et au 20^e voisin (*figure 5*). Afin de garder une cohérence dans les calculs, une seule valeur de *Projection Scale* devait être choisie et notre choix a donc été effectué à partir du nuage de points le moins dense (correspondant au nuage LiDAR de février 2011 sur le linéaire 4).

Pour maximiser les chances d'avoir au moins 5 voisins autour de chaque core-point à la distance $d/2$ (avec d , le diamètre de la *Projection Scale*), cette valeur a été choisie pour correspondre au quantile 95 % de la répartition des distances au 5^e voisin. Comme le montre la *figure 5*, cette distance est de 28 cm dans notre exemple et correspond à un quantile d'environ 68 % de la répartition des points au 20^e voisin. Ce choix de *Projection Scale* correspond

donc à nos attentes, puisqu'il s'agit d'une valeur assez grande pour avoir une probabilité de présence élevée pour 5 points voisins voire plus, mais qui reste assez petite pour détecter les plus petits blocs érodés.

Pour estimer la valeur de la *Normal Scale*, nous avons procédé à l'étude de la rugosité des nuages LiDAR de Carry-le-Rouet. En effet, l'orientation de la normale locale va dépendre de la taille de la sphère de sélection des points. Une sphère trop petite laissera le bruit interne à chaque nuage influencer l'orientation de la normale. A l'inverse, une sphère trop grande conduira à la définition d'une normale locale qui suivra mal les variations d'orientation de la falaise. Nous avons donc mis en place un protocole pour nous permettre de choisir une valeur de *Normal Scale* de façon la plus objective possible.

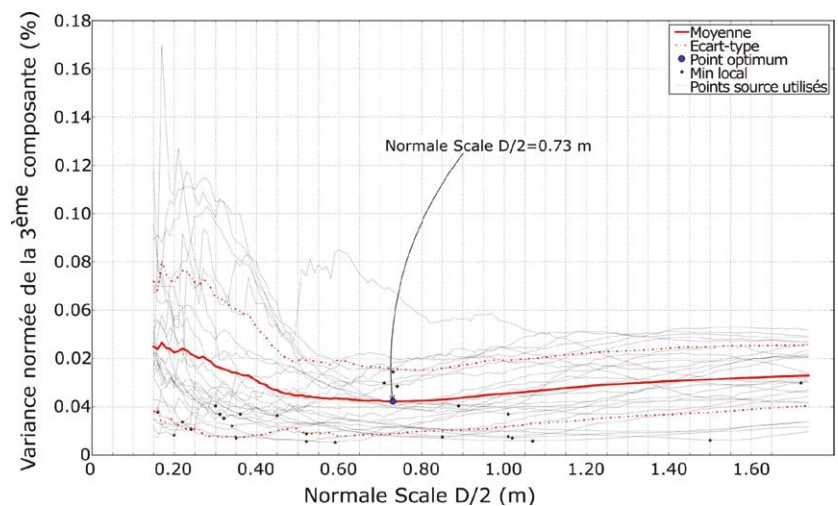


Figure 6. Optimisation du rayon de la *Normale Scale*, exemple pour une portion de falaise en calcarénite sur le linéaire 1.

► Tout d'abord, nous avons choisi des portions de falaise représentatives des unités géologiques présentes (calcarénite, conglomérat ou marnes/sables) afin d'avoir une rugosité des matériaux qui soit homogène sur chaque portion. Ensuite, nous avons choisi des points source sur chaque portion pour réaliser un calcul d'ACP (Analyse en Composantes Principales) en utilisant les points contenus dans une sphère autour de ces points sources et dont le rayon de recherche varie. Enfin, comme le montre la *figure 6*, nous avons regardé la variation de la 3^e composante principale (celle qui correspond à la dispersion en profondeur et qui peut être interprétée comme la rugosité) en fonction du rayon de recherche pour tous les points sources choisis. En moyennant les résultats pour l'ensemble des points sources d'une portion, nous observons que la courbe du ratio de la 3^e composante principale en fonction du rayon de recherche comporte un minimum correspondant au rayon optimum $R=D/2$ pour définir la taille de la *Normal Scale*. En effet, ce rayon de recherche doit être assez grand pour que l'orientation de la normale qui en découle ne soit pas influencée par le bruit interne du nuage de points, mais assez petit afin de permettre à la normale de suivre les variations d'orientation de la falaise liées à l'alternance de couches plus ou moins friables.

Pour chaque portion de falaise étudiée, nous obtenons donc une valeur de rayon optimum (50 cm pour les marnes/sables, 50 cm pour les conglomérats et 73 cm pour les calcarénites). Dans le but d'avoir une cohérence dans les calculs, nous avons donc choisi une unique valeur de *Normal Scale* avec $D/2=50$ cm qui correspond à la valeur optimale pour les portions de falaise composées de marnes/sables et de conglomérats.

■ Modélisation des blocs érodés

Comme le montre la *figure 7*, l'algorithme M3C2 évalue pour chaque core-point la distance de nuage à nuage tout en réalisant un calcul d'intervalle de confiance dans le but de savoir si la distance d'érosion est significative. Pour modéliser les cicatrices d'érosion, il a fallu réaliser une extraction pour chaque comparaison de nuage

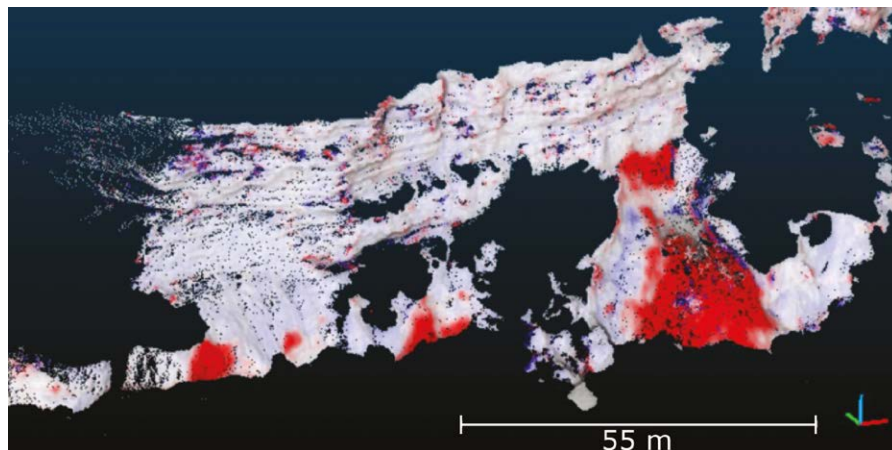


Figure 7. Exemple de résultat de l'algorithme M3C2 sur une portion de falaise du linéaire 4. En rouge les zones d'érosion significatives et en bleu les zones d'accumulation significatives.

à nuage de tous les core-points ayant une distance significative. L'objectif est ensuite de réaliser une classification des core-points contigus. L'enjeu ici est donc de regrouper les core-points ayant une distance significative en groupes représentant les blocs érodés. Pour réaliser cette étape de partitionnement de données, nous nous sommes appuyés sur un algorithme de *clustering* disponible dans la bibliothèque de programmation *Scikit-Learn* en Python : DBSCAN (pour *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*).

Cet algorithme a l'avantage de fonctionner à partir de critères spatiaux contrairement aux algorithmes de type $k_{moyennes}$ ou maximum de vraisemblance. Les paramètres à définir pour cet algorithme correspondent à un nombre minimum de points N que doit contenir chaque groupe et une distance seuil de recherche des points voisins, D_{seuil} . Cette étape permet d'avoir une première approximation en 3D de la forme des cicatrices d'érosion, en se basant sur le nuage de référence sous-échantillonné. Une des difficultés rencontrées est qu'il faut définir des valeurs appropriées pour les paramètres N et D_{seuil} . Le nombre minimum de points que doit contenir un groupe a été fixé à 2 afin d'obtenir les blocs les plus petits possible. En revanche, l'optimisation du seuil de recherche des voisins D_{seuil} est plus complexe et plusieurs valeurs de D_{seuil} ont été testées entre 15 cm et 55 cm afin de comparer les résultats obtenus. Car, lorsque D_{seuil} est inférieure à 15 cm, nous avons observé que l'opération de clustering était alors très influencée par

la faible densité des nuages de points. La valeur de 55 cm a été fixée selon la valeur de la *Projection Scale* (d). Pour améliorer la modélisation de la forme 3D des cicatrices, il est nécessaire de sélectionner les points originaux des nuages comparés situés à l'intérieur des groupes de core-points. A partir de cette sélection, un calcul de cubage des volumes est effectué à partir d'un script MATLAB développé par J. Lundgren, 2010. Ce traitement consiste au calcul d'alphashape qui permet de modéliser chaque bloc de points en réalisant une triangulation 3D de Delaunay puis en testant chaque arête par une valeur maximale. Ces maillages possèdent l'avantage qu'ils peuvent contenir des portions concaves et donc représenter plus fidèlement les cicatrices d'érosion (*figure 8*).

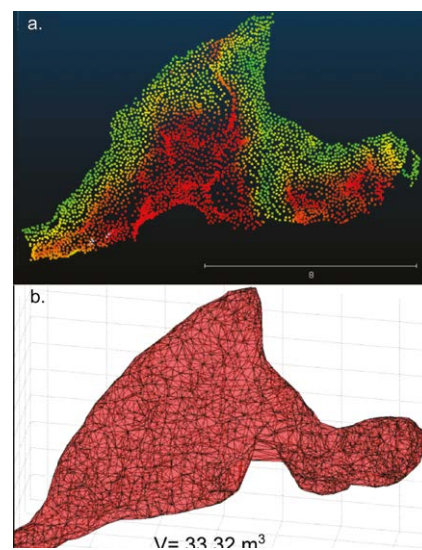


Figure 8. Exemple d'un bloc érodé sur le linéaire 4, à partir des core-points (a) puis, modélisé par maillage (b).



Malgré les procédures mises en place afin de supprimer la végétation des nuages de points avant la chaîne de traitements, il subsiste des distances nuage à nuage suspectes. Elles peuvent être statistiquement significatives, mais positionnées dans des zones résiduelles de végétation qui n'existaient pas sur l'ortho-photo de référence, ou liée à des aménagements urbains. Pour les exclure de la base de données d'érosion, des indicateurs statistiques de la géométrie similaires à ceux de la méthode CANUPO de Brodu et Lague (2012) sont utilisés pour distinguer les faux positifs (érosion non liée à un départ de roche). Cette méthode se base sur l'étude des ratios notés P_1, P_2, \dots des composantes principales de chaque bloc définis de la manière suivante : [1]

$$P_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}; P_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}; P_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad [1]$$

avec λ_1, λ_2 et λ_3 les composantes principales de chaque bloc.

Ces ratios permettent de déterminer si un objet a une géométrie à dominante 3D, 2D ou 1D. Cette méthode part du principe qu'un faux positif aura une géométrie en 3D tandis que les cicatrices d'érosion auront une géométrie plutôt en 2D ou en 1D (en général les volumes éboulés sont en forme de lentille, avec une épaisseur faible au regard de leur hauteur et de leur largeur). La *figure 9* montre la répartition des blocs obtenus dans un diagramme P_1 en fonction de P_2 . Un seuil est défini pour exclure les blocs à la géométrie à dominante 3D. Ce seuil a été fixé à partir de l'observation de la géométrie de plusieurs blocs

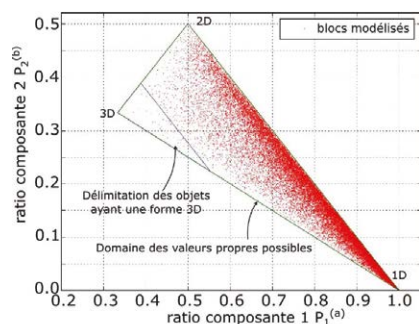


Figure 9. Répartition des ratios des composantes ACP pour les blocs modélisés par classification des points significatifs contigus en cicatrices avec $D_{seuil}=0,25$ m et $N=2$.

identifiés comme étant des faux positifs. Il correspond à la valeur de P_3 lorsque ce ratio atteint 67 % de sa valeur maximale. C'est-à-dire lorsque le bloc étudié a une géométrie en 3D supérieur à 67 %. Environ 0,2 % des blocs sont jugés non conformes et exclus du catalogue de blocs.

■ Analyse des résultats

L'évaluation de l'aléa probabiliste se réalise à partir de la relation entre les volumes éboulés et leurs fréquences d'occurrence. Cette relation est calculée en utilisant une fonction de distribution cumulative complémentaire. Cette fonction correspond au nombre d'occurrences cumulées d'éboulements ayant un volume supérieur ou égal à V rapporté à l'année et par kilomètre linéaire de falaise.

Pour les éboulements, cette relation suit une loi puissance définie par l'équation suivante (Dussauge-Peisser et al., 2002):

$$F = aV^{-b} \quad [2]$$

avec a , le facteur correspondant au nombre de blocs attendu sur une année pour 1 km linéaire de falaise et qui ont un volume supérieur ou égal à 1 m^3 et b , l'exposant qui définit la pente de la loi puissance en échelle logarithmique, et qui caractérise la relation d'atténuation entre les petits et les gros volumes.

La *figure 10* montre la représentation de cette fonction de distribution cumulative complémentaire pour notre catalogue de blocs. Cette fonction représente l'aléa probabiliste de notre site et devrait, en théorie, former une droite en échelle logarithmique. Ce phénomène de sous-estimation du nombre de petits et gros volumes éboulés est décrit dans l'article de Stark et Hovius (2001) et s'explique par le fait que la méthode d'acquisition et la chaîne de traitements ne permettent pas de modéliser de façon exhaustive tous les petits volumes. Pour les plus gros événements, la période de suivi topographique n'est simplement pas assez longue pour pouvoir observer les cicatrices qui se produisent le plus rarement. Un calcul d'ajustement de la loi puissance en prenant en compte tous les blocs ayant un volume minimum est mis en place d'après la méthode décrite dans l'article de Rohmer et Dewez (2013). Ce volume minimum est fixé à 25 litres à partir de l'étude de la variation de l'expo-

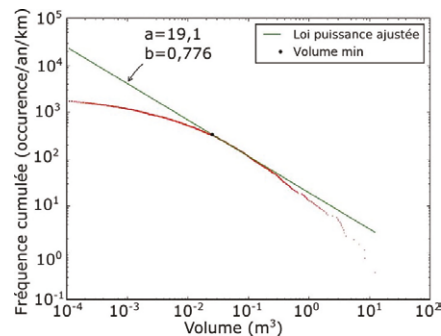


Figure 10. Relation volumes éboulés vs fréquence d'occurrence avec $D_{seuil}=0,25$ m et pour la comparaison des époques 1 et 2. La relation est modélisée par une loi puissance de la forme $F=aV^{-b}$.

sant b en fonction du volume minimum de coupure choisi.

Les résultats de l'évaluation de l'aléa probabiliste montrent un facteur a et un exposant b qui varient selon les paramètres de D_{seuil} utilisés à l'étape de regroupement et selon les époques comparées (entre les nuages de points LiDAR de février 2011 et novembre 2011, entre février 2011 et juillet 2012 et entre novembre 2011 et juillet 2012). Ces paramètres de la loi puissance varient respectivement entre 15 et 70 pour le facteur a et entre 0,4 et 0,75 pour l'exposant b . Ces différentes valeurs sont conformes à ce que l'on retrouve dans la littérature, notamment dans l'article de Rohmer et Dewez (2013).

Un des objectifs de cette étude était d'estimer le taux de recul de la falaise. Pour cela, nous avons calculé un taux d'érosion annuel moyen qui correspond au rapport entre la somme de tous les volumes éboulés des 4 linéaires de falaise et la surface de falaise considérée (c'est-à-dire corrigée des surfaces non prises en compte à cause du bâti ou de la végétation). Ce taux d'érosion est une donnée importante dans l'étude de l'érosion de falaise côtière, car il définit le recul annuel moyen de la falaise étudiée. Il permet de donner une indication plus précise de l'impact de l'érosion sur le risque encouru par les habitations situées en tête de falaise. Ce taux d'érosion annuel moyen varie entre 1,3 cm/an et 5,0 cm/an à Carry-le-Rouet selon qu'on utilise les volumes éboulés déterminés avec les différentes valeurs du paramètre D_{seuil} utilisé à l'étape de regroupement.



Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études d'ingénieur géomètre-topographe a permis le développement d'une nouvelle méthodologie pour la comparaison diachronique de nuages de points LiDAR. Nous avons fait le choix de passer par un point de vue vecteur (c'est-à-dire sans passer par une rasterisation des données LiDAR) qui a été élaborée en utilisant l'algorithme M3C2 (Lague et al, 2013). Appliquée au suivi de l'évolution du trait de côte, cette méthode nous a permis d'identifier les zones de départ de chutes de blocs, évitant ainsi le problème de fragmentation des cicatrices d'érosion qui existait avec une comparaison des données rasterisées selon une grille 2,5D. Les procédures développées pour l'estimation des paramètres de l'algorithme M3C2 (*Projection Scale* et *Normal Scale*) permettent de faciliter l'utilisation de cet algorithme de comparaison et d'objectiver son paramétrage afin d'avoir des paramètres qui soient plus représentatifs des données.

La méthode développée permet donc de caractériser plus finement l'aléa éboulement, et rend aussi possible la modélisation des blocs érodés en 3D avec l'utilisation de l'algorithme DBSCAN. Cette modélisation des blocs érodés en 3D permet une première approche pour l'étude des mécanismes d'érosion, même si l'utilisation de l'algorithme DBSCAN présente quelques inconvénients car les critères utilisés par cet algorithme sont difficiles à optimiser. Il est donc possible d'imaginer le développement d'une procédure pour modéliser ces blocs qui se baserait sur une seconde comparaison plus localisée des nuages de points en réutilisant l'algorithme M3C2.

Par ailleurs, la méthode utilisée pour la détection des faux positifs dus à des résidus de végétation non filtrés pourrait être adaptée afin d'être plus robuste en utilisant de façon plus poussée la méthode CANUPO (Brodu et Lague, 2012).

On peut noter que ce projet d'analyse spatiale se base sur des données issues d'acquisitions LiDAR qui peuvent être améliorées afin de faciliter le traitement des données. Un des points d'améliorations possibles qui n'est pas développé

dans cet article serait de réaliser des acquisitions LiDAR avec une fréquence temporelle plus élevée, sur le long terme et avec une densité de points plus élevée. ●

Remerciements

Les données LiDAR ont été acquises au cours du projet national VALSE. Ce projet a été financé avec le concours de la DREAL PACA, du Conseil Régional PACA et du BRGM ainsi que du projet national C2ROP.

Contacts

Baptiste FELDMANN

École supérieure des géomètres et topographes, Le Mans, France
feldmann.baptiste@gmail.com

Clara LÉVY - Thomas DEWEZ

Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, France
c.levy@brgm.fr - t.dewez@brgm.fr

Nathalie MARÇOT

Bureau de recherches géologiques et minières, Marseille, France
n.marcot@brgm.fr

Références bibliographiques

- Brodu, N., Lague, D., 2012. *3D terrestrial LiDAR data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Application in geomorphology*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 68, 121-134.
- Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J.-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., Giraud, A., 2002. *Probabilistic approach to rockfall hazard assessment: potential of historical data analysis*. Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2, 15-26.
- Giuliano, J., 2015. *Erosion des falaises de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur : évolution et origine de la morphologie côtière en Méditerranée*. Thèse de doctorat, Université Nice-Sophia Antipolis, 416 p.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. *Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82, 10-26.

Lundgren, J., 2010. *script MATLAB alphavol.m pour le calcul d'alphashapes, version 1.3*. Site internet : <https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28851-alpha-shapes>; dernière consultation le 09/06/17.

Marçot, N., 2006. *Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence-Alpes-Côte d'Azur - Année 2 : Définition des enjeux sur le linéaire de falaises côtières, caractérisation et hiérarchisation des risques*. Rapport BRGM RP- 54316-FR. 72 p. 27 ill. 1 ann. 12 cartes hors texte.

Rohmer, J., Dewez, T., 2013. *On the deviation of extreme sea-cliff instabilities from the power-law frequency-volume distribution: practical implications for coastal management*. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 1698- 1703, ISSN 0749-0208.

Stark, C. P., Hovius, N., 2001. *The characterization of landslide size distributions*. Geophysical Research Letters, vol.28, 6, p. 1091-1094.

ABSTRACT

Keywords: time tracking, cliff, rockfall risk, LiDAR, mobile laser scanning

The diachronic comparison of LiDAR point clouds has allowed estimating rockfall hazard for many alpine cliffs. The acquisition of adequate data for coastal cliffs is more difficult as the ideal location for Terrestrial Laser Scanning (TLS) or drone measurements is located in the submersible area. Thus, the acquisition of LiDAR data from a boat was tested during the VALSE project (2011 - 2015), showing the difficulties of processing this kind of data (Giuliano, 2015). This study complements existing work by proposing a method to compare LiDAR surveys with a vector point of view (i.e., without data rasterization), developed using the M3C2 algorithm (Lague et al., 2013). Distances between clouds, statistically qualified, are used to map erosion zones as well as to deduce the shape of the collapsed blocks by grouping the points belonging to these zones.

Le souterrain du Krak de Montréal Jordanie



■ Paul COURBON

Le magnifique Krak de Montréal, bâti par les croisés, s'appelle maintenant Qal'at ash-Shawbak. Il domine les paysages semi-arides, juste au nord de Petra.

À première vue, l'article qui suit aurait plus sa place dans une revue d'histoire ou d'archéologie, plutôt que dans une revue de topographie. Pourtant ! Dans leur quête du passé les archéologues n'abordent pas tous les aspects de ce passé. Dans ce cas précis, leur formation littéraire ne les a pas amenés à se poser des questions sur les aspects techniques de ce souterrain : son creusement et le guidage topographique de ce creusement. Nous allons tenter de remédier à cette lacune.

L'approvisionnement en eau des châteaux forts était vital en cas de siège. Les châteaux étant toujours situés sur des hauteurs, cet approvisionnement posait des problèmes. En fait, dans la plupart des châteaux les ressources en eau étaient assurées par de vastes citernes où était stockée l'eau de pluie tombant sur les toits, ou sur de vastes aires rocheuses canalisées.

Cependant, en de nombreux endroits, on préféra creuser des puits, souvent très profonds. C'est en Allemagne, pays minier par excellence, que l'on en trouve en plus grand nombre. Le plus profond connu est le Kyffhauser Brunnen avec 176 m. En France, on trouve quatre forteresses avec des puits de plus de 100 m. Plusieurs de

ces puits ont été creusés au Moyen Âge, aux XII^e et XIII^e siècles. C'est le cas de Kyffhauser Brunnen et du puits de la Halle à Cordes-sur-Ciel (France). En France, les puits de la citadelle de Besançon et du Fort de Joux, profonds de 130 m, ont été creusés sous Vauban, autour des années 1690.

Dans le Proche-Orient, le plus remarquable est BirYoussef, au Caire (figure 1). Il fut creusé au XII^e siècle par ordre de Salah ed-Din Youssef, pour alimenter la citadelle qui domine le Nil de près de 90 m. D'une profondeur totale de 88 m, il atteint la nappe phréatique du fleuve. Il comporte en son milieu un vaste palier où des bœufs faisaient tourner un système de norias, relayant l'élévation de l'eau jusqu'à la surface. Un escalier de six pieds de large s'enroule autour du puits. On connaît d'autres puits en Syrie : à Shumaymis, ou à la citadelle d'Alep.

Ici, au château de Shawbak, le schéma est un peu différent : nous n'avons pas un puits, mais une longue galerie souterraine, qui suivant la pente du pendage rocheux, arrive jusqu'à une source située 80 m plus bas en altitude. Elle était citée par les archéologues, ou historiens, mais sans aucune précision, qualifiée à plusieurs reprises d'escalier hélicoïdal. À ma connaissance c'était un cas unique qu'il était intéressant d'étudier. Une équipe italienne [1] avait fait son étude en 2006-2007, mais avait laissé de nombreux flous et donné des

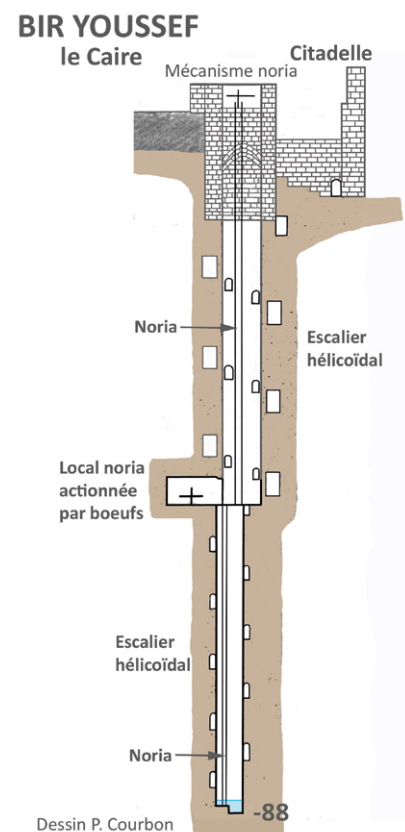


Figure 1. L'extraordinaire Bir Youssef, au-dessus du Caire. Il surpasse, et de loin, les plus beaux puits européens. Il date du XII^e siècle

analyses et conclusions peu satisfaisantes. En mai 2018, j'ai voulu profiter de mon intervention au site troglodytique de 'Iraq al-Amir, près d'Amman, pour faire un saut à Shawbak et voir moi-même ce site exceptionnel.



■ **Brève histoire du Krak de Montréal**

Aujourd'hui connu sous le toponyme Qal'at ash-Shawbak, le nom d'origine de ce château est Krak de Montréal, car il fut construit par les croisés à partir de 1115 à l'initiative de Baudouin I^{er} de Jérusalem. La première moitié du XII^e siècle est pour le Krak de Montréal une période de développement, de prospérité et de paix relative. Mais, à partir de 1169, prise en étau entre l'Égypte de Salah-ed-Din et la Syrie de Nour ed-Din, la citadelle est plusieurs fois assiégée et sa situation se détériore. En avril 1187, plus de 12 000 musulmans assiègent les kraks de Montréal et des Moabites (aujourd'hui Karak). Après un an et demi de siège, les assiégés durent rendre les armes et Salah ed-Din s'empara de la forteresse.

La citadelle fut donnée par Salah-ed-Din à son frère Malek Adel et forma dès lors un émirat. Le fort fut par la suite occupé par les mamelouks à partir de 1250, puis tout au long de l'Empire ottoman. Le Krak de Montréal fut en partie détruit par Ibrahim Pacha lors de son occupation du Levant en 1840.

La galerie de la forteresse

■ **Le contexte de la zone du château**

Nous sommes ici, à 25 km de Petra, à l'extrémité nord d'un relief qui arrête les dernières pluies venant de la Méditerranée. D'après la carte pluviométrique de la Syrie et de la Jordanie, il y tombe en moyenne 290 mm de pluie par an, une quantité du même ordre qu'à Amman. Cela correspond aux régions semi-arides, mais permet cependant la formation de sources permanente, si utiles pour affronter la longue saison sèche. Si on admet que la galerie aboutissant à la source a été creusée par les croisés, on comprend quel fut son rôle lors du siège de la citadelle. Complétant en fin de saison sèche la vaste citerne que l'on peut voir dans le château, est-ce elle qui permit en partie de résister à un siège pendant dix-huit mois ?

■ **Aperçu géomorphologique**

Cet aperçu semble nécessaire pour comprendre le creusement de la galerie et les irrégularités qu'on y trouve.



© OFA-Bacri & Normier 2013

Figure 2. La stratification mise à profit lors du creusement apparaît parfaitement sur cette vue aérienne. La source se trouve tout près du carrefour au bas de la photo.

Le krak de Montréal se trouve sur une jolie butte conique de roche calcaire (figure 2), coincée dans la confluence de deux wadis. Ce n'est pas un calcaire massif, car il est marqué par une stratification très nette en bancs peu épais. Cette stratification visible au sol, l'est encore plus sur l'image aérienne jointe. Sous terre, ces strates sont rendues encore plus apparentes par les longues lentilles de silex noir qui les accompagnent.

Le creusement de la galerie a utilisé au maximum cette stratification. En effet, les lignes de fracturation marquées par les joints de strates rendent beaucoup plus facile l'attaque du rocher lors du creusement. Ici, avec une pente de 50 %, il suffisait de suivre les strates pour descendre rapidement. Les photos que nous avons prises l'attestent. Sauf dans la toute première partie, où la direction à prendre par la galerie ne le permettait pas, le creusement a utilisé la pente des strates au maximum.

Il y a une autre zone où la galerie a traversé les strates pour gagner plus rapidement de la profondeur, nous en discuterons plus loin. Je pense qu'à l'époque, les connaissances géomorphologiques étaient sinon innées, ou acquises sur le tas, au cours des multiples chantiers. Les creuseurs de la galerie ont exploité au maximum les

facilités de creusement que leur offrait le pendage.

■ **Description de la galerie**

UTM36/WGS84 - Entrée et sortie		
X 745.713	Y 3380.404	Z 1 350 env.
X 745.752	Y 3380.268	Z 1 275 env.

Distance horizontale entrée-puits de sortie : 140 m, dénivellation 75 m.

La galerie part du bastion sud de la forteresse, pour rejoindre une source située au fond du vallon situé en contrebas. Son orifice est bien marqué, fermé par une porte grillagée en fer, au pied d'un mur bordant le chemin de ronde des remparts (figure 3).

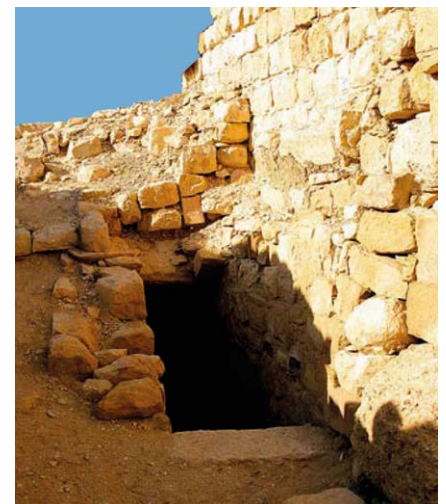


Figure 3. L'entrée du souterrain.

Des marches bien maçonnées permettent de gagner rapidement 4 m de profondeur. Là, démarre le creusement d'une galerie descendante, de direction 195°, permettant de sortir hors du périmètre des remparts. Les marches sont de belle facture, car sans doute restaurées, et on atteint la profondeur de 15 m environ (figure 4). Après un virage de 55° à droite, la galerie prend la direction 140° qu'elle va suivre jusqu'à la fin avec quelques petites irrégularités. Aussi loin que porte la vue, sa section paraît régulière avec une dimension moyenne de 2 m de large et de 2,5 m de haut. Les marches n'ont pas été restaurées et sont usées. Taillées à même le rocher, elles sont souvent en pente et il faut prendre garde de ne pas glisser. Sur les parois, on voit parfaitement la stratification et les veines de silex qui la soulignent. La pente régulière est de 50 %. Au bout de 50 m, nous arrivons au point clé de la galerie, surnommé pompeusement escalier hélicoïdal, alors qu'il ne comporte qu'une seule spire permettant de gagner 5 à 6 m de profondeur.

Concernant cette partie hélicoïdale de l'escalier, il faut noter qu'à son entrée et à sa sortie, ont été bâties deux voûtes en jolies pierres de taille. A la voûte supérieure, voulait-on bloquer les pierres qui pouvaient tomber d'un petit conduit partant en hauteur que nous verrons plus loin ? Mais en bas ? Etait-ce une coquetterie des tunneliers qui ont voulu

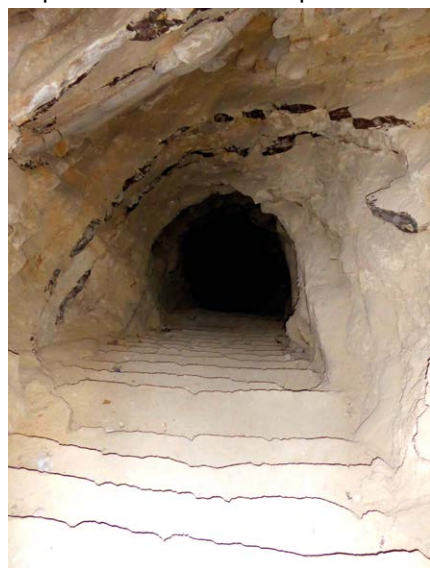


Figure 4. Dans les 20 premiers mètres de creusement, la galerie traverse exceptionnellement les strates, sans en tenir compte.



Figure 6. Dans la partie hélicoïdale, la pente s'accélère, on plonge en coupant les strates.

souligner cette partie qui sort du schéma général de la galerie ?

A la lecture de l'article italien, j'avais été intrigué par cet "escalier hélicoïdal" (figure 5) qui coupe la galerie en son milieu. J'avais pensé à la technique employée dans les *qanâts* (système d'irrigation souterrain d'origine perse) : entre les deux extrémités d'une future galerie, on creuse à partir de la surface des puits intermédiaires, ce qui fait gagner du temps en permettant à plusieurs équipes de travailler simultanément dans les deux directions à partir



Figure 5. Zone de jonction entre la galerie venant du fond (en bas) et celle venant de la forteresse (en haut). La jonction faite, la galerie a été élargie. Elle suit les strates et les marches sont usées par de multiples passages.

de ces puits. On crée ainsi un aérage et on limite la longueur du transport des déblais. Mais l'examen des lieux me fit abandonner cette hypothèse : au-dessus de la première voûte de l'escalier hélicoïdal, pas d'amorce nette d'un puits vers la surface qui aurait été obstrué un peu plus haut à la fin du creusement. Seulement un petit conduit naturel vertical, de forme irrégulière, obstrué par les pierres au bout de quelques mètres. Rien d'un conduit bien taillé permettant l'aération et l'évacuation des pierres du creusement.

Une dizaine de mètres plus bas que la partie hélicoïdale, on note au-dessus du plafond de la galerie une deuxième petite galerie superposée et de même direction, la hauteur du plafond dépasse 5 m (figure 6). Les Italiens l'ont assimilé à tort à un conduit karstique.

■ La technique de creusement

Cette galerie superposée nous ramène vers les techniques de creusement des tunnels. En fait, la galerie a été creusée simultanément à partir de ses deux extrémités : la forteresse et la source. Cette technique était toujours employée dans les tunnels, depuis l'Antiquité et le Moyen Âge pour aller plus vite. Les moyens topographiques de l'époque n'avaient pas la précision actuelle ! Aussi y avait-il des tâtonnements dans la zone, où était espérée la jonction entre



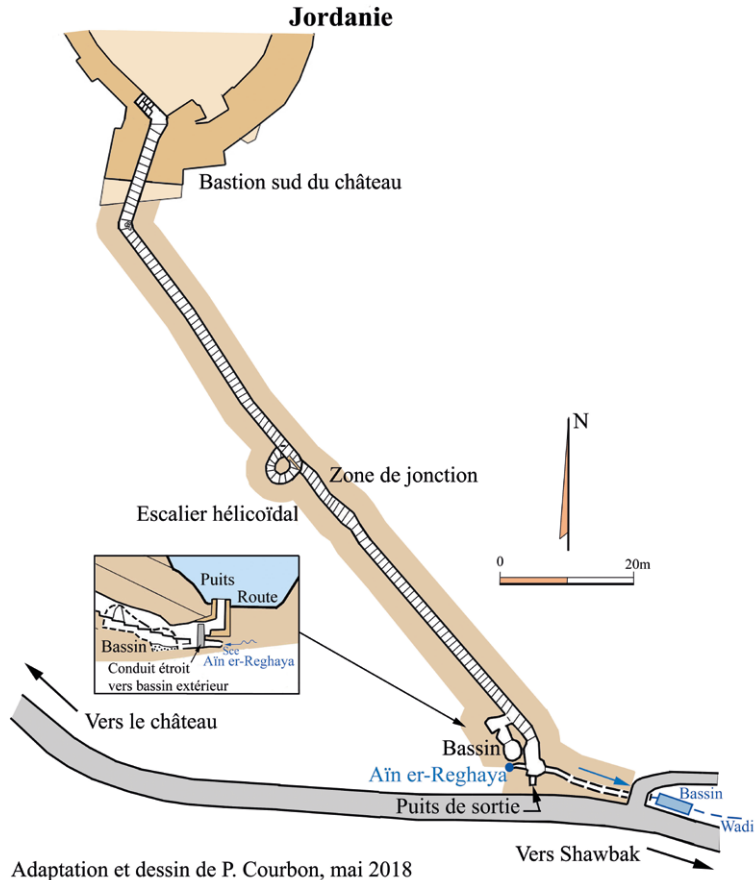
les deux équipes. À l'époque, dans cette zone, la jonction se faisait souvent au son : on se dirigeait vers le bruit des pics et marteaux de l'autre équipe.

Ici, une galerie était trop haute par rapport à l'autre. Rattraper cette différence de niveau s'est fait par une pente plus forte de la galerie sur une courte portion et, une dizaine de mètres plus haut, par l'escalier hélicoïdal. Dans ce rattrapage, on recoupe les strates au lieu de les suivre.

Comme cela se faisait toujours, on creusait tout d'abord un tunnel de petite section. Ce n'est qu'une fois l'erreur de jonction corrigée que l'on agrandissait la galerie en largeur et en hauteur pour une utilisation plus confortable. Malgré cet élargissement de la galerie, des irrégularités subsistent, visibles sur le plan et la coupe jointes (figures 7 et 8).

Au-delà de cette zone de jonction, la galerie reprend sa pente régulière suivant les strates, jusqu'à atteindre une petite salle où coule la source appelée *Aïn er-Reghaya* (Source qui mousse). Les constructeurs n'ont pas pris la peine de mettre la jonction entre la galerie et la salle au gabarit de 2 m par 2,5, elle est un peu plus basse ! À moins qu'au cours de l'aménagement moderne de la salle, on ait rehaussé son sol. Quant à la source, elle sourd entre les pierres, 1 m plus bas que le sol de la salle. Par un conduit étroit, elle ressort à l'extérieur, 15 m plus à l'est, alimentant un bassin au fond d'un *wadi*.

SOUTERRAIN DU KRAK DE MONTREAL



Adaptation et dessin de P. Courbon, mai 2018

Figure 7. Le plan montre la bonne jonction des parties aval et amont de la galerie, juste quelques irrégularités dans la zone de jonction. La source ne sert plus au château, mais se déverse dans un bassin au profit des habitants de la zone.

Quant au captage de la source pour les besoins de la forteresse, il se faisait un peu en amont : sur le côté de la galerie principale, une petite galerie descendante mène à une petite salle ronde de

3,5 m de diamètre qui semble être une citerne et dont le sol est malheureusement encombré par pierres et terre qui s'y sont éboulées. Pour moi, ce n'était pas une citerne, mais seulement un bassin rond, en communication directe avec la source. L'eau y était plus facile à puiser que dans la source elle-même qui sort d'une fissure étroite. Une petite salle contiguë à ce bassin, de forme carrée, permettait sans doute d'entreposer les bacs ou fûts pleins d'eau à monter. Il est regrettable qu'une fouille n'ait pas été entreprise dans le bassin souterrain par les archéologues qui ont fait appel aux spéléologues. La découverte de tessons aurait permis de mieux cerner son utilisation.

Juste au-dessus de la source, un puits remontant de 6 m de hauteur permet de regagner la surface, débouchant en bordure d'une route asphaltée montant à la forteresse. Ce puits est de facture moderne : d'une section carrée de 1 m de côté, il est maçonné soigneusement

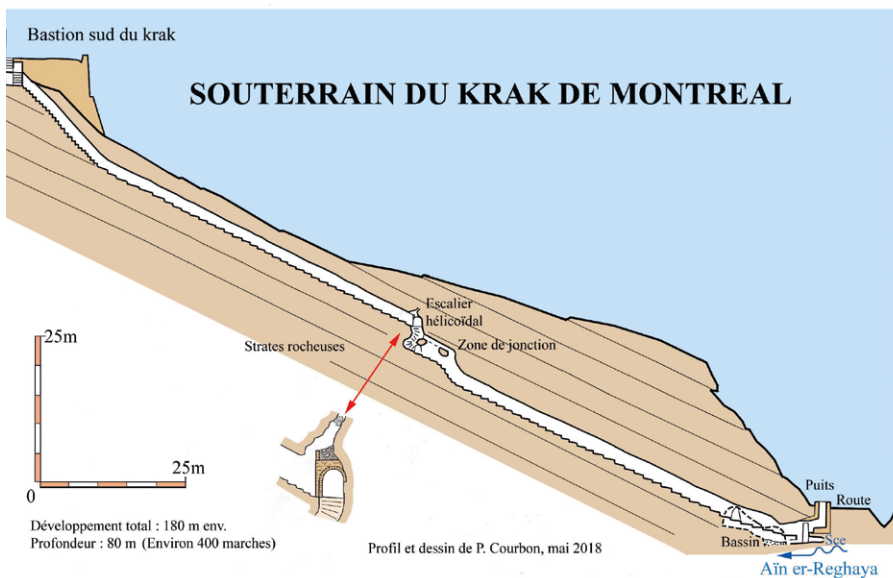


Figure 8. On a utilisé au maximum le pendage de la roche au cours du creusement. En bas, l'agrandissement montre mieux le conduit menant l'eau au bassin extérieur.



et comporte des marches en fer scellées dans la pierre. Je ne pense pas qu'il soit l'œuvre de ceux qui ont creusé la galerie, leur source devait rester à l'abri des regards et sans accès extérieur !

Ce puits remplace-t-il l'accès ouvert du temps des croisés pour sortir tous les déblais du creusement ? Une fois le creusement du tunnel terminé, il est vraisemblable que les croisés aient obstrué et recouvert soigneusement cette ouverture qui aurait laissé un passage aux ennemis éventuels.

À une époque plus récente, ce puits a sans doute été aménagé pour avoir un accès facile à la source, pouvoir la nettoyer et assurer la bonne alimentation du grand bassin au fond du *wadi*.

À titre de vérification, j'ai compté près de 400 marches pour l'ensemble du souterrain, ce qui est cohérent avec la profondeur atteinte : 80 m.

■ Orientation du tracé de la galerie

En tant que topographe, je m'étais intéressé à la manière dont les tunneliers de l'Antiquité se guidaient pour joindre les deux portions aval et amont de tunnel, lors de leur creusement simultané. Je renvoie à l'article que j'avais écrit dans XYZ [2]. À l'époque, ni les théodolites, ni la boussole n'existaient encore et les instruments topographiques utilisés étaient des plus rudimentaires. En 2012 et 2013, j'avais participé à l'étude d'un réseau de puits et *qanâts* en Arabie. Alors qu'en surface les regards de *qanâts* étaient parfaitement alignés, les galeries souterraines les joignant comportaient des écarts de direction montrant la difficulté à bien se diriger lors d'un creusement souterrain.

A Shawbak, il faut signaler que si l'écart vertical de jonction entre les deux galeries était bien supérieur à 5 m (*figure 8*), il était seulement de 1 à 2 m sur le plan horizontal. On peut s'étonner d'une aussi bonne précision en direction, car non seulement il y a un virage important dans la galerie au départ du fort, mais encore, il n'y a pas de vision directe entre le fort et la source, à cause de la rupture de pente créée par une falaise. Cela devait créer un problème d'orientation.

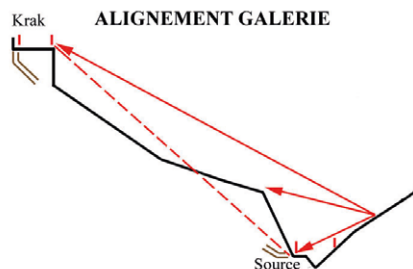


Figure 9. De la source, on ne voit pas le krak. Il a fallu monter sur le versant du *wadi* pour aligner des jalons permettant d'orienter la galerie.

En partant de la citadelle, la première partie descendant de 4 ou 5 m a une voûte maçonnée. Donc, avant la construction de la voûte, on pouvait faire une visée vers l'extérieur et une vers l'intérieur pour orienter le creusement.

Mais que penser des 20 m de creusement qui suivent la voûte ? Ils s'écartent de 50° de la direction vers la source. Pour quelle raison ? Craignait-on en prenant la direction de la source de taper dans la base des remparts, très élevés dans cette portion de la forteresse ? Ou, faute de pouvoir s'orienter directement sur la source, y a-t-il eu une erreur au début des travaux, rectifiée ensuite par la venue d'un tunnelier plus compétent en topographie ?

Comment a-t-on déterminé la direction entre le fort et la source ? Les anciens topographes connaissaient la méthode du "Fourrier" qui permet de recréer un alignement entre deux points qui ne se voient pas l'un de l'autre. Ici, avec l'abrupt de la falaise, le terrain ne s'y prêtait pas. Je pense qu'en s'élevant dans le versant opposé du *wadi*, on pouvait voir à la fois le fort et la source. Il suffisait ensuite de déterminer des alignements par des jalons. Je suis admiratif devant le savoir-faire de celui qui a dirigé les opérations d'orientation de la galerie.

■ Utilisation de la galerie

Différemment de ce qui a été écrit, cette galerie n'est pas d'un parcours facile avec sa pente de 50 % qui s'accroît à la partie hélicoïdale et 10 m plus loin, à la jonction des parties aval et amont. Même pour des mulets, cela devait poser problème, surtout à la descente. Quant aux hommes, affamés après un long siège, la remontée pouvait leur

prendre encore plus de leurs forces déclinantes ! Cette galerie a-t-elle réellement servi ? Certainement si l'on considère l'usure des marches !

Parmi toutes les alimentations en eau des forteresses portées à ma connaissance, celle-ci me semble unique et mériterait un complément d'étude par un chercheur habitué au monde souterrain et à son utilisation par l'homme. ●

Remerciements

À l'IFPO Amman et Thibaud Fournet qui ont facilité ma visite de la forteresse, à Élodie Vigouroux qui m'a transmis le travail des Italiens.

Contact

Paul COURBON
paul.courbon@yahoo.fr

Bibliographie

[1] Ezio BURRI, Carlo GERMANI, Massimo MANCINI, Michele NUCCIOTTI, Mario PARISE, Guido VANNINI, 2009, *a tunnel for exploitation of natural spring in Shawbak Castle (Jordan)*, Opera Ipogea 2009-1, Rivista della Società Speleologica Italiana, p. 61-67. (Rédigé sans bonheur en Anglais dans une revue italienne)

[2] Paul COURBON, 2012, *les creusements de la roche de l'Antiquité à la poudre*, XYZ n° 130 (Revue de l'Association française de topographie)

ABSTRACT

Many fortresses have been built on hills or summits allowing an easier defense and also a better control of a way or an area. These citadels dominate the landscape often more than 100 m. But in case of siege, water supplying was very important and vital. The military means were bigger than the farmers' ones and the depth of many wells dug in fortresses exceeds 100 m. Krak de Montreal is an apart case: we have no wells but a long steeply gallery which reaches an underground spring 80 m lower. As land surveyor, more the history of the krak, the authors try to understand how was dug the gallery and how was found the right direction during the digging.

Nicolas Sahnès, les Simonnet, Christian Zimmermann : le rouge dans le vert

■ Jean-Pierre MAILLARD

Depuis des décennies, pour permettre une gestion publique plus efficace, les "36 000" communes françaises sont encouragées à fusionner pour créer des unités territoriales d'un poids de population suffisant. Votée en 2015, la loi portant sur la nouvelle organisation territoriale de la République (loi NOTRe) accélère le processus en confiant de nouvelles compétences aux régions et en redéfinissant clairement celles attribuées à chaque collectivité territoriale.

Dans ce mouvement il est donc paradoxal qu'une nouvelle commune, Val-de-Reuil dans l'Eure, ait vu le jour en 1983. Support de la ville nouvelle du Vaudreuil, conçue pour permettre un desserrement de l'agglomération rouennaise et voulue par l'État dans les années 1970, le territoire de la nouvelle collectivité territoriale a en effet été soustrait autoritairement de celui des huit communes rurales d'origine inévitablement opposées au projet. Dès lors, on comprend que les conditions d'intégration de l'urbanisation nouvelle n'étaient pas réunies, le développement de l'agglomération ne pouvant qu'en souffrir. Val-de-Reuil est de fait moins connue que ses grandes sœurs telles Cergy-Pontoise, Evry et Marne-la-Vallée.

Pourtant, comme les huit autres opérations de ville nouvelle portées par l'État à cette époque, Val-de-Reuil a également permis de fixer des entreprises et des emplois de qualité, de répondre à de nombreux besoins de logements et de créer une vie sociale et culturelle à l'échelle du projet.

L'art urbain

La politique d'intégration de l'urbanisation dans le paysage d'une grande boucle de la Seine a prévu le respect d'une palette de couleurs, une grande place à la nature par l'aménagement de grands espaces verts, de voiries bordées d'arbres et l'encouragement des résidents à fleurir balcons et jardinières. La dominante environnementale s'est vérifiée au fil des années jusqu'à promouvoir désormais une ville "naturellement vôtre", l'actuel slogan rolivalois. Dans ce cadre, la réalisation de nombreuses interventions plastiques a complété l'ambiance générale et contribué à l'identité des quartiers. Ainsi depuis près de cinquante ans, la ville collectionne des murs peints et des sculptures jusqu'à être aujourd'hui perçue comme une galerie à ciel ouvert et être remarquée, à l'ombre des métropoles, comme d'autres villes telles Barentin en Seine-Maritime ou Vitry-sur-Seine en Val-de-Marne.

Le fonds d'origine est constitué de trois murs peints, deux respectivement des pinceaux d'Henri Cueco et Emanuel Proweller et d'un troisième porteur d'une atmosphère mobile chromatique de Luis Tomasello, une installation de multiples trapézoïdes fixés sur le pignon d'un immeuble et ordonnés en X et en Y. Ce fonds a été abondé par le dépôt d'œuvres réalisées *in situ* lors d'un symposium international de sculpture organisé en 1979 et de nombreuses commandes dans l'esprit du 1 % culturel. On l'a vu, l'art et la géométrie ont été visibles très tôt avec la composition de Luis Tomasello déjà signalée dans une rubrique "Art et géométrie" (cf. XYZ n° 98). Une récente visite à Val-de-Reuil montre qu'il n'est plus le seul à défendre l'expression géométrique et cinétique

car, sans prétendre être complet, on peut témoigner que la section "art et géométrie" rolivaloise s'est enrichie d'au moins trois réalisations qui ont en commun d'être de couleur rouge.

Dans un environnement verdoyant le rouge et le vert, couleurs complémentaires, s'opposent harmonieusement, la chaleur du rouge étant bien contenue par la fraîcheur des végétaux. Il a alors suffi qu'à la vue des trois œuvres le ciel soit un peu bas, qu'une grisaille s'impose pour amplifier l'émotion visuelle suscitée par le rouge finalement presque éblouissant.

IP 1

Au croisement de la route des Falaises et de la chaussée de Léry le théâtre de l'Arsenal a été inauguré en 2015. Sur le parvis, la ville de Val-de-Reuil et l'architecte ont choisi de déposer IP 1, une sculpture de Nicolas Sahnès en relation



© Yvette Vélaz

IP 1



avec l'édifice. L'artiste a détourné l'usage de poutres destinées à la construction métallique en composant une ligne brisée 3D sans fin. L'enchevêtrement du linéaire crée nettement l'illusion du mouvement qui n'est pas sans suggérer la danse. De plus l'intérêt peut aussi être porté sur le vide intérieur, un volume encore plus difficile à appréhender que tous les segments de la ligne brisée. La hauteur de la sculpture (3,10 m) s'intègre bien dans l'espace jusqu'à être perçue comme du mobilier urbain. La couleur rouge renvoie au logotype du théâtre et s'insère heureusement dans l'ambiance végétale de l'emprise des voies.

Nicolas Sanhes est né en 1965 à Rodez et diplômé de l'École des Beaux-arts de Perpignan. Ses travaux l'ont conduit successivement à utiliser du goudron, du bois puis du métal qu'il pratique désormais, le débitant, l'assemblant et le soudant dans une recherche d'équilibre et de légèreté. La géométrie de ses œuvres permet de les concevoir sans échelle, celle retenue étant adaptée au lieu destiné à recevoir la réalisation.

Installation polymorphe des Simonnet, rouge

De l'autre côté de la route des Falaises, aux pieds de la mairie de Val-de-Reuil, une réserve foncière engazonnée de libre accès au public reçoit trois installations polymorphes, deux blanches et une rouge. Créées par Marthe et Jean-Marie Simonnet, elles sont tout autant œuvres d'art que jeux d'enfants. L'installation de couleur rouge à mi-chemin entre le mille-pattes et le chameau fait en même temps le plaisir des yeux et la joie des enfants qui chevauchent la bête. Depuis longtemps, les Simonnet confectionnent des superstructures par assemblage de sections modulaires cylindriques et



L'arbre-forêt

© Yvette Velay

sphériques d'un diamètre constant de 50 cm. Pour Jean-Marie Simonnet *"La rationalité du jeu modulaire va permettre de dépasser l'imaginaire de l'artiste. La combinatoire illimitée qu'il présente et met à la disposition d'autrui, ouvre le champ de la création par des moyens rationnels..."*

Après s'être rencontrés aux Beaux-arts de Paris d'où ils sortiront diplômés en 1970, Marthe et Jean-Marie Simonnet font œuvre et vie communes. Ils se consacrent exclusivement aux créations et réalisations d'œuvres plastiques : sculptures, peintures, jeux d'extérieur pour enfants, cerfs-volants monumentaux avec le souci d'intégrer leur production à la vie de leurs contemporains.

L'arbre-forêt

Pour sa part Christian Zimmermann a investi le croisement de cette même chaussée de Léry avec la route des Sablons, au sud. L'implantation de son arbre-forêt de sept mètres de hauteur

avec ses dix-sept troncs a induit l'aménagement d'un giratoire de forme carrée en cohérence avec la sculpture qui symbolise le végétal : deux silhouettes aux contours presque identiques, quasi symétriques en leurs milieux et croisées à angle droit. La forme des branches, en voûte d'ogive, et les feuilles de l'arbre, qui ressemblent à des croches sur une portée de musique médiévale, donnent à l'ensemble un côté rétro. Il est inattendu qu'une œuvre actuelle puisse renvoyer autant au passé dans une ville qui n'en a pas. Pour le présent, Christian Zimmermann explique que l'arbre-forêt est peint en rouge, la couleur du sang, le même sang qui coule chez tous les hommes. Il précise que l'individu est aussi la collectivité et appelle au vivre ensemble, dans la solidarité et l'ouverture aux autres.

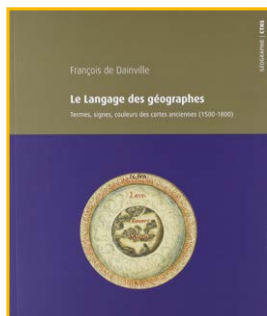
Christian Zimmermann, autodidacte haut-normand, se définit comme un artiste calligraphe, une discipline qu'après de solides études de philosophie, il enseigne depuis de nombreuses années.

Ainsi, ces dernières années, le "musée en plein air" de Val-de-Reuil s'est notablement enrichi des trois œuvres rouges. Elles apportent, chacune à leur manière, une poésie singulière en lien avec l'environnement végétal, un écrin vert grandement valorisé tout comme, réciproquement, ce dernier magnifie les sculptures, le tout à mettre au crédit culturel de la cité contemporaine. ●



Installation polymorphe

© Yvette Velay



■ Le langage des géographes Termes, signes, couleurs des cartes anciennes 1500 - 1800

François de **DAINVILLE**

Préface de **Hélène RICHARD**,

Jean-Louis TISSIER et **Cécile SOUCHON**

*Avec le concours de Françoise Grivot
(Docteur de l'université de Paris)*

Du XVI^e à la fin du XVIII^e siècle, "savoir la géographie, alors, c'était avant tout savoir la carte" comme l'écrivait l'historien et géographe jésuite François de Dainville. Inspiré par le Mercure géographique du R.P. Auguste Lubin, cet ouvrage permet de comprendre le langage utilisé par les géographes, arpenteurs, ingénieurs et marins durant trois siècles. L'auteur restitue la diversité de leur graphisme et l'évolution de leur lexique avant l'uniformisation en 1802 des projections, échelles, et signes conventionnels indispensables à la lecture des cartes. Par sa rigueur scientifique et son caractère multilingue, son glossaire demeure un guide précieux pour tout historien ou amateur curieux de cartes anciennes.

L'ouvrage, après l'introduction, est construit en trois grandes parties : en premier lieu les critères fondamentaux de la représentation de la planète Terre ; en second lieu est abordée la géographie naturelle, inspiration première des auteurs de cartes ; la troisième partie, sans doute la plus riche, s'intitule Géographie historique.

Un index alphabétique de 4 500 termes occupe 45 pages, il est suivi de l'index des signes (5 pages) et de celui des couleurs (16 pages). A noter la proximité de l'auteur avec Jacques Bertin du C.F.C. (Comité français de cartographie) dans les années 60.

François de Dainville (1909-1971), historien, géographe et prêtre jésuite français, est connu pour ses travaux fondateurs consacrés à l'histoire de l'éducation et de la cartographie.

► **CTHS - GÉOGRAPHIE / CTHS**
34 € - 302 pages - ISBN :
978-2-7355-0859-4



■ Guide de l'enquête publique

L'enquête publique est un moment fort du processus de démocratie participative. Elle informe le public et permet de recueillir ses observations sur les plans, programmes, projets d'aménagement ou d'équipement, susceptibles de porter atteinte à l'environnement, à des intérêts collectifs ou particuliers, afin que cette expression soit prise en considération dans le processus de décision.

Le commissaire enquêteur, tiers indépendant, inscrit sur une liste d'aptitude départementale et nommé dans la majorité des cas par le président du tribunal administratif, est chargé de la conduite de l'enquête. Depuis 1996, le "Guide du commissaire enquêteur" l'accompagnait pas à pas dans ses missions.

L'édition 2018, mise à jour et renouvelée grâce à l'implication personnelle de Jean-Pierre Chaulet, vice-président du CNCE, s'adresse désormais à tous les acteurs de l'enquête publique : maîtres d'ouvrage, autorités organisatrices, public, professions et associations acteurs de l'environnement, etc. Elle ambitionne de devenir l'outil pratique indispensable pour la bonne fin de tout type d'enquête publique.

Cet ouvrage comporte 6 pages de sigles et acronymes.

► **Ce guide est édité par la Compagnie nationale des commissaires enquêteurs**
80 € - 265 pages
ISBN : 978-2-9510571-5-9
Pour tous renseignements : cnce@cnce.fr

■ Gestion du temps pour managers et professionnels débordés

*Bien gérer son temps c'est bien
faire ce qui est important !*

Hervé COUDIÈRE

Dans un contexte professionnel de plus en plus exigeant, où l'on demande de toujours faire plus avec moins, comment mieux gérer son temps, mais aussi aider ses collaborateurs à mieux s'organiser ?



comment associer efficacité, bien-être et collaboration avec les autres ? Pour l'auteur, la réponse commence par ces quelques mots : bien gérer son temps, c'est bien faire ce qui est important ! Construit autour de 4 étapes clés et illustré de situations concrètes, cet ouvrage propose des outils pratiques adaptables à sa situation et sa personnalité.

Ce qui va permettre de faire face à sa charge de travail avec sérénité, prioriser ses activités, savoir dire non, réagir au quotidien...

Retrouvez concentration et efficacité, mais pas seulement ! Car si l'important est de bien gérer son temps, maintenir des relations positives et durables avec votre entourage l'est tout autant.

Hervé Coudière est consultant et coach en management, il adapte les techniques et les outils de gestion du temps aux situations rencontrées dans les organisations.

► **GERESO ÉDITION - 23 € - 275 pages**
ISBN : 978-2-35953-641-6

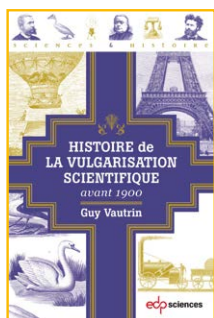
■ Histoire de la vulgarisation scientifique avant 1900

Guy VAUTRIN

De Fontenelle à Gaston Tissandier, la vulgarisation trace son chemin à travers les remous de l'Histoire, avec les abbés Nollet, Pluche et Moigno – soucieux de concilier religion et science – et les républicains Arago, Figuier, Flammarion, Meunier, Jules Verne et tant d'autres.

Elle permet à un public de plus en plus varié grâce aux progrès de la presse et de l'imprimerie, de suivre de près les découvertes scientifiques, mais aussi de comprendre les progrès techniques qui modifient la vie quotidienne : le chemin de fer, l'électricité, les ascenseurs, la bicyclette et l'automobile, etc. Ce public peut même assister aux démonstrations lors des grandes Expositions universelles qui éclairent le siècle.

Des collections spécialisées voient le jour, Manuels Roret, Bibliothèque des Merveilles. Les premières revues périodiques de vulgarisation se multiplient. Cosmos



et La Nature préfigurent les revues modernes. De grandes revues généralistes, La Revue des Deux Mondes, Le Magasin pittoresque, l'Illustration, n'hésitent pas à publier des articles de vulgarisation.

Guy Vautrin, polytechnicien, a mis sa formation scientifique au service des industries pétrolière et pharmaceutique, il s'est passionné pour la vulgarisation et a constitué une collection d'ouvrages anciens sur ce sujet..

► **EDP SCIENCES**
34 € - 407 pages
ISBN : 978-2-7578-2246-1



■ Ça peut toujours servir Guillemette FAURE

On a tous un tiroir d'anciens chargeurs pour des appareils qui ne fonctionnent plus... Parfois surgit l'obligation de vider sa maison et l'on réalise que ce que l'on gardait parce que "ça peut toujours servir" n'avait de valeur qu'à vos yeux. Pourquoi peignons-nous à nous séparer de ce qui raconte notre vie ? Une plongée dans nos placards mais aussi dans nos angoisses et dans notre psyché !

Guillemette Faure est journaliste chroniqueuse à M, magazine du Monde, spécialiste de l'observation des tocs de l'époque.

► 17,50 € - 196 pages
ISBN : 978-2-234-08433-9

RÉPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 156	
COVADIS GEOMEDIA	4° de couv.
ESRI	2° de couv.
FIG 2018 Saint-Dié	3e de couv
LEICA GEOSYSTEMS	2
REIS STOLZEL	16

■ 2 ouvrages de Pierre Leman :



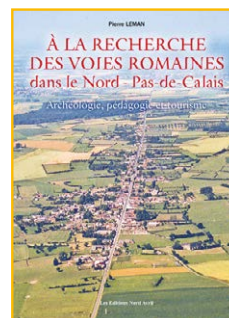
Archéologues des Hauts-de-France de 1790 à nos jours

Dictionnaire-biographique des Archéologues originaires des Hauts-de-France, ou qui ont fouillé comme ces officiers des troupes allemandes ou britanniques. On y relèvera les noms connus de Jacques Boucher de Perthes, d'Auguste Mariette, de Roger Agache, de l'abbé Biévelet, mais aussi de nombreux archéologues amateurs. Les sources des 240 notices proviennent de la consultation de revues spécialisées et d'archives familiales. Une trentaine de photographies et de caricatures agrémentent l'ensemble. C'est aussi une façon de redécouvrir des sites et des musées régionaux avec le témoignage d'écrivains comme Gustave Flaubert, Romain Rolland. Un hommage est rendu au Père Lambiez qui, à Bavay, lança en 1790 la première revue archéologique, Feuille d'Or. Un tableau replace les trouvailles du Nord de la France dans le contexte des principales découvertes contemporaines (Abou Simbel, Vix, Machu Pichu, Lucy...).

► **Presses Universitaires du Septentrion**
20 € - 196 pages
ISBN : 978-2-7574-1728-7

■ À la recherche des voies romaines dans le Nord-Pas-de-Calais Archéologie, pédagogie et tourisme

Cet ouvrage dresse l'inventaire des principales voies romaines du Nord-Pas-de-Calais. On y trouvera quelques explications relatives à la solidité de ces routes, seul héritage encore visible de l'œuvre de Rome alors qu'ont disparu à jamais de notre paysage temples, amphithéâtres et aqueducs. Sur le terrain comme sur les cartes, les lecteurs pourront ainsi mieux connaître cet aspect du savoir-faire romain et de ses conséquences sur la vie culturelle, religieuse de la région dans l'Antiquité. Les amateurs de rallyes, de randonnées, auront matière à de nouveaux circuits, en connexion avec les G.R. Des mises en valeur touristique, des animations pédagogiques, des ouvertures de sites accessibles aux handicapés sont également proposées et suggérées. Un livre indispensable pour ceux qui veulent découvrir la région, en particulier nos amis belges.



À noter une liste inédite de tous les musées et parcs archéologiques du Nord-Pas-de-Calais, Picardie et Belgique.

Cet ouvrage comprend 87 cartes de l'IGN et illustrations, dont 10 de P. Megueulle, ainsi qu'une importante bibliographie.

Pierre Leman est conservateur honoraire du patrimoine, ancien directeur de la circonscription archéologique Nord-Pas-de-Calais et ancien professeur associé à l'Université d'Artois (Patrimoine et Tourisme).

► **Les Éditions Nord Avril - 25 € - 142 pages**
ISBN : 978-2-915800-48-7



■ Petit éloge des gares

Pierre LASSUS

Qui n'a jamais senti la magie d'une gare ? Pour chacun, la vie des gares, ou du moins la vie d'une gare, est un lieu de sa propre histoire : on y a vécu des attentes, des séparations, des retrouvailles, des rencontres, des réconciliations... Il est sûr que la gare peut être considérée comme une métaphore de la vie elle-même : on y débarque un jour, on s'y agite, puis on la quitte pour un ailleurs. Il y a en France 3 029 gares. Chacune a son histoire particulière, discrète ou inscrite dans la grande Histoire, une histoire de guerre, de paix, de négociations, de départs et de retours. Pierre Lassus nous restitue ici cette âme des gares, et offre à chacun une chance de redécouvrir "sa" gare, de la regarder autrement, de l'"habiter", et de repartir pour un beau voyage dans son imagination et ses souvenirs. Ce livre est une déclaration d'amour pour les gares.

Pierre Lassus est psychotérapeute spécialiste de l'enfance, conférencier et essayiste.

Éditions François Bourin - 14 € - 195 pages
ISBN : 979-10-252-0401-6

L'Afrique à l'honneur

■ Claire GALPIN

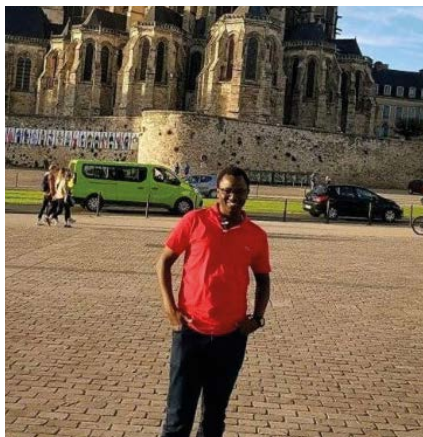
Un happy end pour un parrainage du cursus universitaire pendant 3 ans

Olivier Ntayagabiri est arrivé en France il y a 3 ans en compagnie de Felix Niyonkuryu son compère de longue date. Il a laissé au Burundi, sa femme Justine et sa petite fille de quelques mois Nicky, pour tenter sa chance à l'ESGT. Felix a dû repartir au bout d'un an au Burundi où depuis il applique les connaissances acquises en topographie. Pendant 3 ans Olivier a travaillé dur, passant chaque année, dans le niveau supérieur avec de très bons résultats.

Il a découvert le métier de géomètre-expert lors de son stage de 1^{re} année dans un cabinet des Vosges et a contribué lors de ce même stage au rayonnement des associations Topo Sans Frontières et GSF. Olivier et Felix ont fait une analyse du système foncier burundais et mené des expériences dans le cadre de modes alternatifs de certification foncière. Ils ont ainsi apporté leur appui à des services fonciers communaux pour la mise à jour de leur base de données et la résorption des stocks de demande de certificat foncier.

En seconde année il a découvert les travaux de bathymétrie, de géodésie et la topographie appliquée chez VEODIS-3D. Le stage a consisté à effectuer des relevés bathymétriques de lacs et des retenues d'eau afin de produire des modèles numériques de terrain (MNT) du fond de ces plans d'eau et de les comparer avec ceux élaborés les années précédentes afin de suivre l'évolution des phénomènes de dépôt et d'érosion.

Finalement il a rejoint l'École nationale supérieure des techniques avancées (ENSTA Bretagne) à Brest pour effectuer dans le cadre du travail de fin d'études, une recherche intitulée "Analyse des retards troposphériques



Olivier NTAYAGABIRI

GPS sur la zone Nord-Atlantique dans le cadre de la campagne NAWDEX". Le mémoire associe formules mathématiques complexes et paragraphes didactiques qui permettent une lecture agréable mais spécialisée.

De quoi s'agit-il ? Dans le cadre du projet DIP-NAWDEX (*North Atlantic Waveguide Downstream impact Experiment*), les données de 1 367 stations GNSS ont été acquises pour mieux comprendre la dynamique et les perturbations atmosphériques sur l'arc Atlantique Nord. Ce TFE vise à fournir un jeu de données de retards troposphériques complet, et de qualité, sur cette zone. Ce jeu de données devra permettre une description précise de la distribution spatiotemporelle de la vapeur d'eau atmosphérique sur la zone d'étude. Le TFE est dédié à une analyse des séries temporelles des retards troposphériques GPS fait suite à la campagne NAWDEX dont l'objectif est de comprendre, à partir des mesures (dont les mesures GPS), les perturbations atmosphériques sur la zone Nord-Atlantique. La recherche a permis d'aborder différentes thématiques relevant de disciplines comme la géodésie, la météorologie et les statistiques.

Après une soutenance brillante, il est reçu comme ingénieur de l'ESGT. ●

Autres bonnes nouvelles. Deux de nos membres actifs en Afrique font grand honneur à GSF.

Mathias Koffi est agroéconomiste spécialiste du foncier et représentant de GSF en Côte d'Ivoire. Il va prendre les fonctions de directeur des opérations à la nouvelle agence du foncier rural (AFOR) en Côte d'Ivoire.



Willy Franck Sob, ingénieur ESGT, directeur de SOGEFI Cameroun et représentant GSF au Cameroun a intégré le réseau des *Young Surveyor* de la FIG (YSN) au sein duquel il représente dignement la francophonie avec quelques autres jeunes africains.

<https://www.facebook.com/FigYoungSurveyorsNetwork/photos/a.286510834791295/1499469076828792/?type=3>



N'oubliez pas que GSF continue à collecter les appareils anciens en fonctionnement pour leur donner une seconde vie auprès des membres des pays en développement.

Contact : geometresansfrontiere@gmail.com

29^e ÉDITION

FESTIVAL INTERNATIONAL DE GÉOGRAPHIE



DE SAINT-DIÉ-DES-VOSGES
5, 6 ET 7 OCTOBRE 2018

LA FRANCE DEMAIN

PAYS INVITÉS : LES PAYS NORDIQUES



FONDATEUR : Christian Pierret

WWW.FIG.SAINT-DIE-DES-VOSGES.FR





BIM

Infrastructure c'est nous !

Groupe GEODESIAL

Logiciels métiers d'étude et de conception
Géomatique - Urbanisme - Infrastructure - BIM

COVADIS

AUTOPISTE 1/7

Nouveautés

Voirie et Réseaux Divers

- Nouveau module réseau d'assainissement en 3D dynamique
- Bibliothèque d'objets en 3D : regard, déversoir, branchement ...
- Nouveaux objets 3D trottoir : bordure, caniveau et bateau
- Nouvelle coupe dynamique sur nuage de points
- Nouveau module projet linéaire



Technologie BIM

- Évolution de la technologie objet pour le BIM
- Inter-portabilité des données avec Import/Export IFC et IMX
- Échange avec le logiciel Revit (Autodesk)
- Création d'une maquette paysagère avec InfraWorks (Autodesk)



Topographie & DAO

- Le PCRS V2 nouvelle version : évolution de la norme
- Création et gestion des états parcellaires avec import SPDC
- Nouvel objet parcelle paramétrable
- Nouvelle fonction de dessin automatisé sur nuage de points



Projet linéaire AutoPISTE

- Nouveaux Giratoires circulaires et de formes complexes
- Nouveau module bretelle/échangeur
- Épure de giration dynamique



GEOMEDIA_{SAS}

Tel 02 98 46 38 39
contact@geo-media.com
www.geo-media.com