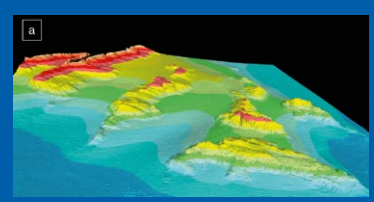
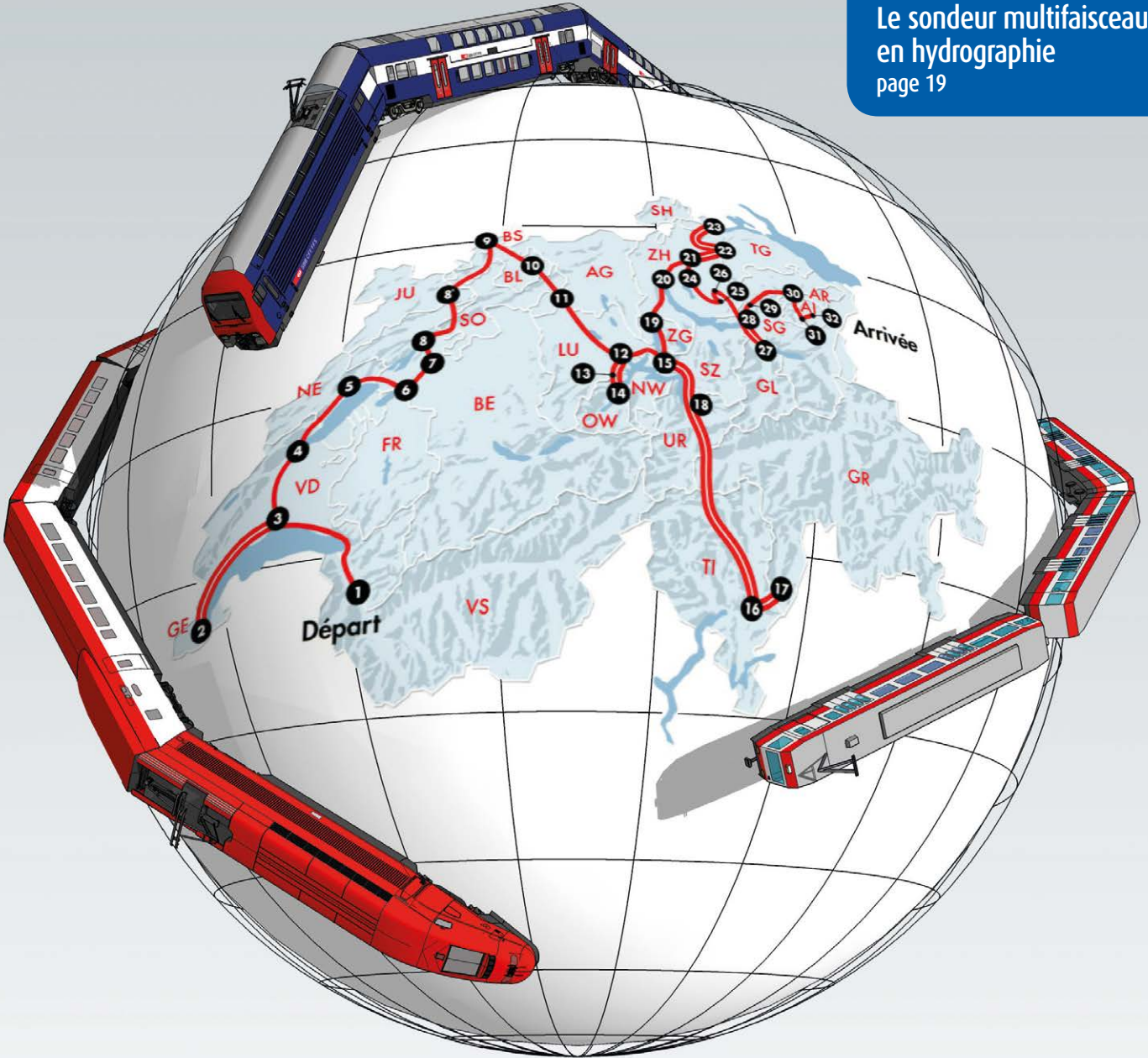


AVZ



Le sondeur multifaisceaux
en hydrographie
page 19



Les 26 cantons suisses en 16h54



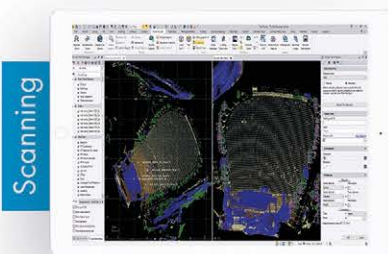
TRIMBLE BUSINESS CENTER



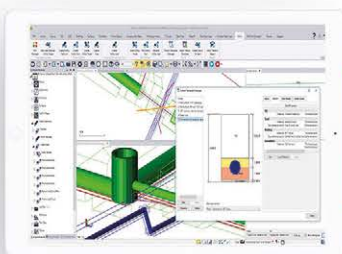
5.0 SUITE LOGICIELLE COMPLÈTE POUR VOS TRAVAUX DE TOPOGRAPHIE ET CONSTRUCTION

Flux de travaux complet :
Du terrain aux livrables en toute confiance

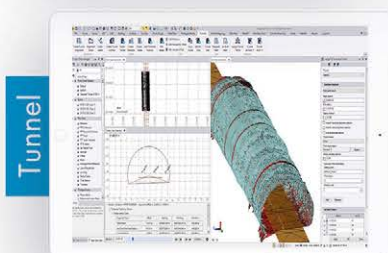
Le logiciel modulable qui permet de réaliser tous vos projets post traitements **GNSS, géocodification, outil CAD, photogrammétrie, MNT, etc...**



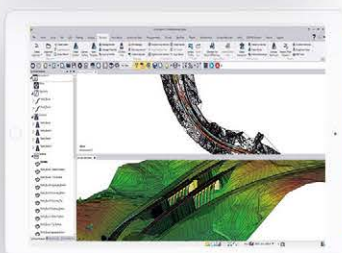
Scanning



Réseaux



Tunnel



Projets routiers



Siège social
208 Rue de l'Ancienne Distilerie
69400 GLEIZE
04 74 69 94 00

Agence Paris
3 Rue des Prés
91290 Arpajon
01 64 55 11 80



Votre partenaire
en solutions géospatiales

info@geotopo.fr

www.geotopo.fr

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

Rédacteur en chef adjoint

Flavien Viguière
Ingénieur topographe

Comité de rédaction

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

Ghyslaine 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

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

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

Conception et maquette

Dorothee 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

4^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 : Itinéraire de train pour poser le pied dans
chacun des 26 cantons suisses en 16 h 54 en transports
publics. Illustration d'Emmanuel Cledat utilisant une carte
de Laura Cipriano et les modèles de x2x2x, Leon H, et Le A.
disponibles sur la 3D Warehouse de SketchUp.

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

Membre de la FIG (Fédération internationale des géomètres) 
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>

Éditorial 3

InfoTopo

> Les informations de la profession 4

Manifestation

> Les géomètres et le BIM à l'honneur durant
les journées de la topographie 2018 8

> Intergeo® 2018 à Francfort
Olivier REIS 10

> SIG 2018 la conférence francophone Esri
Mathieu KOEHL 12

> FIG 2018 : la géopolitique du local
Jean-Pierre MAILLARD 13

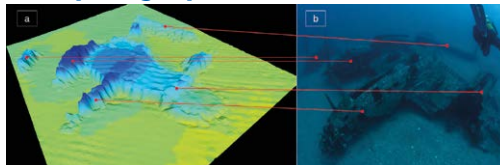
> IPIN La 9^e conférence internationale sur
le positionnement et la navigation en intérieur
Bernard FLACELIÈRE 15

Hommage

> Michel Louis (1930 - 2018)
C. BOUCHER, F. DUQUENNE, M. KASSER 16

> Hommage du Bureau des longitudes
à Jean Kovalevsky
Claude BOUCHER - François BARLIER
Nicole CAPITAINÉ - François MIGNARD 17

Hydrographie



> Le sondeur multifaisceaux en hydrographie :
utilisations actuelles et futures
Arnaud ABADIE - Christophe VIALA 19

SIG

> Un algorithme pour battre le record
du SwissTrainChallenge : poser le pied dans chacun
des 26 cantons le plus rapidement possible
en utilisant uniquement des transports publics
Emmanuel CLEDAT - Dirk LAUINGER 30

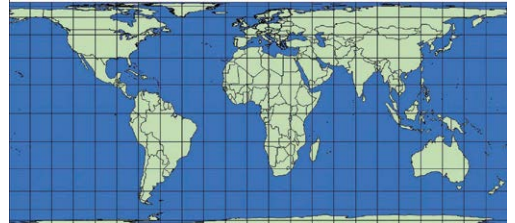
Topographie

> Génération d'observations pour la validation
ou la comparaison de logiciels d'ajustement
de mesures par moindres carrés
Stéphane DURAND 37

PROCHAIN XYZ - n° 158

N'ayez pas peur du coefficient de réfraction ! —
Première partie sur les enjeux de la réfraction en
nivellement trigonométrique

Géodésie



> Les représentations planes cylindriques de la Terre
Françoise DUQUENNE 45

GNSS

> Étude de faisabilité et choix optimal d'une station
RIMS d'EGNOS en Algérie
Tabti LAHOUIARIA - Kahlouche SALEM
Benadda BELKACEM 52

Topo vécue



> Relevé de la grotte glacée de Cenote Abysse
dans les Dolomites
Farouk KADEDÉ - Tommaso SANTAGATA 57

Histoire

> La forme de la Terre dans l'Histoire occidentale
Xavier DELLA CHIESA 61

Art et géométrie

> Tadao Ando : l'art dans la vigne
Jean-Pierre MAILLARD 68

Ouvrages

André BAILLY 70

GSF

> Décentralisation de la gestion foncière :
état des lieux et défis au Burundi
Claire GALPIN 72

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>



Du nouveau dans votre revue XYZ

Certains jeunes adhérents m'ont un jour demandé de rénover la présentation de votre revue et donc de sa maquette. Le modèle de la couverture, avec le *xyz* que vous connaissez bien, date effectivement du numéro 86 de février 2001. Dans l'éditorial du XYZ 120 de septembre 2009, Tania Landes annonce le nouveau logo qui trône actuellement en haut de couverture.

Alors qu'en pensez-vous cher lecteur, doit-on changer le graphisme ? Il me tarde que le courrier des lecteurs, info@aftopo.org, reçoive propositions et avis.

Si la forme du journal compte, le fond encore plus. Celui-ci passe par la variété et la qualité des articles et le comité de rédaction s'y emploie. Pour ce faire, il met en œuvre et dirige un comité de lecture dont le rôle est de valider les articles puis de dialoguer avec les auteurs pour améliorer la contribution.

Depuis cet automne, les équipes se réorganisent en conséquence. Nouveau rédacteur en chef adjoint, Flavien Viguière seconde le rédacteur en chef et assure une veille parisienne. Retraité actif, Michel Kasser dirige l'équipe de relecture, après l'avoir restructurée. Vous trouverez la liste des membres du comité de rédaction dans l'ours à la *page 1* et ceux du comité de lecture, en cours de réorganisation, à la *page 9*. La rédaction se doit de remercier chaleureusement celles et ceux qui s'impliquent dans la revue en donnant ainsi de leur temps libre.

À ce stade de l'éditorial, je ne peux que proposer aux adhérents intéressés de nous rejoindre dans l'aventure : vous avez envie d'écrire, de relire, de commenter, de contribuer à notre vie associative, contactez-nous pour faire un bout de chemin ensemble.

Mettez à jour votre agenda : en troisième de couverture vous trouverez l'annonce du forum annuel de la topographie. **Le lycée Henri Loritz de Nancy nous accueillera le jeudi 28 mars 2019 sur le thème "l'immersion numérique en topographie"**. Réalité virtuelle, réalité augmentée, système interactif, simulation, maquette 3D seront les mots clés des conférences que vous suivrez ce jour, après avoir visité les stands de nos nombreux et fidèles partenaires exposant leurs innovations techniques et applaudi les jeunes lauréats du prix de l'AFT. À ce sujet la rédaction est fière d'annoncer que six jeunes diplômés de différentes écoles francophones ont postulé au prix, dont le résultat sera annoncé en cette fin d'année.

Le numéro de décembre célèbre habituellement les fêtes de fin d'année avec ses lecteurs. Le conseil de l'AFT, la rédaction de XYZ souhaitent donc à tous ses adhérents et abonnés une très bonne année, personnelle et professionnelle.

**Bernard Flacelière,
rédacteur en chef**

■ Lancement réussi du satellite de mesure des vents Aeolus de l'ESA depuis Kourou

Aeolus, le satellite de mesure des vents construit par Airbus pour le compte de l'Agence spatiale européenne a été lancé avec succès depuis Kourou, en Guyane. Il est le premier satellite capable d'observer le profil des vents à l'échelle du globe, et ce, tous les jours en quasi-temps réel. Ce satellite de 1,4 tonne est doté d'un instrument LIDAR baptisé Aladin, qui utilise l'effet Doppler pour mesurer la vitesse des vents à différentes altitudes. Aladin envoie une puissante impulsion laser ultraviolette à travers l'atmosphère et recueille, grâce à un

télescope de 1,5 m de diamètre, la lumière rétrodiffusée qui est ensuite analysée à bord par des récepteurs ultrasensibles, dans le but de déterminer l'effet Doppler des diverses couches atmosphériques à différentes altitudes. Les données ainsi collectées fourniront des informations fiables sur les profils des vents à l'échelle du globe, qui permettront aux météorologues d'améliorer la précision de leurs prévisions et aux climatologues de mieux comprendre la dynamique générale de l'atmosphère terrestre.

Satellite Aeolus



©ESA

■ Lancement du nouveau récepteur GNSS TRIMBLE R10

TRIMBLE annonce le lancement de son nouveau modèle de récepteur GNSS, le TRIMBLE R10 Modèle 2. Conçu pour aider plus efficacement les utilisateurs dans un large éventail de travaux, ce système permet des acquisitions fiables, rapides et précises de données topographiques. Le Trimble R10 Modèle 2 offre 672 canaux GNSS ainsi qu'une protection améliorée contre les interférences afin de supprimer toute source de brouillage pour des performances optimales dans un spectre de fréquences de signal de plus en plus encombré. Le moteur de traitement Trimble HD-GNSS permet de réduire considérablement les temps de convergence et d'obtenir une haute fiabilité de position et de précision, tout en réduisant la durée d'occupation des mesures. La compensation complète d'inclinaison permet à la canne de levé d'être inclinée jusqu'à 15° pendant la mesure, ce qui permet au Trimble R10 de mesurer des points qui seraient inaccessibles à d'autres systèmes de topographie GNSS.

► Pour plus d'informations : <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/r10>



■ LEICA RTC360, la nouvelle solution de Leica Geosystems pour la capture de la réalité en 3D

Leica Geosystems présente Leica RTC360, sa nouvelle solution nomade et polyvalente pour la capture de la réalité en 3D. Offrant une productivité accrue, cette innovation combine le scanner laser 3D léger, compact et précis le plus rapide du marché, le nouvel outil logiciel terrain Cyclone FIELD 360, qui permet l'assemblage et un contrôle de la qualité sur site et Cyclone Register 360 pour le traitement des données au bureau. Leica complète ainsi son offre avec une solution de numérisation 3D performante, simple et accessible à destination des professionnels de la construction, de l'industrie et de la sécurité publique en quête de précision et de fiabilité.

Le Leica RTC360 a une vitesse d'acquisition allant jusqu'à 2 millions de points par seconde, est doté d'un système d'imagerie sphérique HDR intégré et permet d'obtenir un nuage de points tridimensionnel colorisé en moins de 2 minutes, grâce à 3 caméras 12MPx. Il faut en outre moins d'une minute pour obtenir un scan 360 en imagerie HDR quelles que soient les conditions de lumière. Intégrant une mini-centrale inertielle et 5 caméras, sa technologie innovante *Virtual Inertial System* permet de suivre avec précision en temps réel le mouvement de la position du scanner par rapport à la station précédente.





■ Le satellite "océanique" Sentinel-6A prend forme

L'intégration de Sentinel-6A, le premier des deux satellites qui continueront de mesurer les niveaux de la mer à partir de 2020, vient de franchir un nouveau jalon et sa phase critique : le couplage du module de propulsion avec la nacelle du satellite dans les locaux d'Airbus. Au cours de cette opération délicate, les spécialistes d'Airbus ont hissé la plate-forme du satellite d'environ 5 m de haut avec une précision millimétrique au-dessus du module de propulsion. Les deux modules ont ensuite été accouplés et assemblés. Les deux satellites Sentinel-6 destinés au programme pour l'environnement et la sécurité Copernicus de la Commission Européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ESA) sont actuellement développés sous la maîtrise d'œuvre industrielle d'Airbus. À compter de novembre 2020, Sentinel-6A sera le premier à poursuivre les mesures de la surface des océans entamées en 1992. Sentinel-6B prendra ensuite le relais en 2025. Sentinel-6 est une mission qui fournira des mesures de haute précision sur la topographie de la surface des océans. Le satellite évaluera la distance qui le sépare de la surface de l'océan avec une précision de quelques centimètres et, durant les sept années de sa mission, utilisera les données recueillies pour cartographier l'ensemble de la topographie, à raison d'un cycle de revisite de dix jours. Un tel degré de précision dans l'observation des variations de hauteur de la surface des océans permettra de fournir des informations sur le niveau des mers, la vitesse et la direction des courants, ainsi que le stockage

Satellite Sentinel-6A



©ESA

de chaleur dans l'océan. Ces mesures sont indispensables pour modéliser les océans et anticiper les montées des eaux. Ces données permettront aux gouvernements et institutions d'établir des plans de protection efficaces pour les régions côtières. Elles seront particulièrement précieuses pour les agences de gestion des catastrophes naturelles et les autorités chargées de l'urbanisme, de la sécurisation des bâtiments ou de la certification des digues. Le niveau des océans augmente actuellement de trois millimètres par an en moyenne en raison du réchauffement climatique, ce qui pourrait, à terme, avoir des conséquences dramatiques pour les pays à forte démographie littorale.

■ Drone professionnel Intel® Falcon 8+ Edition Topcon

Le nouveau drone professionnel Intel® Falcon 8+ Edition Topcon est un octocoptère (8 moteurs) qui est maintenant disponible sous trois configurations :

- "SURVEY" avec un appareil photo Sony Alpha 7R à 36 M Pixel principalement pour de la photogrammétrie ;
- "Inspection" avec la combinaison d'un appareil visible et d'une caméra thermique pour les applications d'inspection ;
- "Inspection Manuelle" qui permet à l'utilisateur de démarrer son activité d'inspection avec un minimum d'options tout en gardant la possibilité de migrer vers l'une des deux configurations précédentes.

Le drone Intel® Falcon 8+ Edition Topcon a une très grande résistance aux perturbations extérieures et permet d'obtenir une précision et une exhaustivité des données. Une évolution permanente des charges utiles complète le système pour combiner les capteurs.



■ KINEIS : lancement d'une constellation de nanosatellites dédiée à l'IoT (Internet of Things, Objets connectés)

À l'horizon 2020, le nombre d'objets connectés dans le monde dépasserait les 30 milliards. Un boom sans précédent qui transformerait l'économie mondiale. Mais aujourd'hui 90 % de la surface du globe est non connectée ou connectée à des coûts souvent prohibitifs, sans mentionner la complexité d'usage. Les besoins sont pourtant déjà présents : logistique, pêche, agriculture ou encore loisirs de plein air sont autant de secteurs demandeurs d'une connectivité mondiale abordable. Pour répondre à ces problématiques et pour faciliter l'usage de cette technologie, CLS (Collecte Localisation Satellites) a créé Kinéis avec le soutien du CNES. La connectivité Kinéis s'appuie sur une nouvelle constellation satellitaire innovante, constituée de 20 nanosatellites, basée sur une technologie de communication inédite, développée sur mesure pour les objets connectés. CLS a confié le développement de cette constellation à Thales Alenia Space (maîtrise d'œuvre du système complet), à Nexeya (fabrication des plates-formes des nanosatellites) et Syrlinks (support dans la conception et la construction de l'instrument). Cette constellation sera placée en orbite à l'horizon 2021. Avec Kinéis, CLS révolutionne ARGOS et démocratise un système qui a permis de réécrire l'histoire des migrations animales, de gérer durablement les ressources marines, de lutter contre la piraterie, de suivre les plus grandes courses au large. Plus performante, plus évidente, très abordable, la connectivité Kinéis unique et universelle sera bientôt disponible pour le plus grand nombre (loisirs de plein air, plaisance, etc.) et le secteur privé (logistique, pêche, agriculture, etc.).



► ■ **Cadasta 2.0 : une plate-forme prise en charge par Esri pour améliorer la documentation sur les droits des terres et des ressources**



Depuis sa fondation, Cadasta s'est concentré sur le fait d'être le principal fournisseur d'outils et de services techniques destinés à appuyer la documentation des droits sur les terres et les ressources, afin de bâtir des communautés plus fortes et durables. En facilitant la documentation, le stockage, la gestion et le partage efficaces des informations sur les droits à la terre et aux ressources, nous visons à créer un monde où même les individus et les communautés les plus marginalisés pourront bénéficier des opportunités offertes par les droits sur les terres et les ressources naturelles. Depuis la publication initiale de la plate-forme, le travail de Cadasta s'est élargi pour inclure des partenariats avec 28 organisations établies dans 13 pays différents et la documentation des droits sur les terres et les ressources de plus de 100 000 ménages.

La technologie est conçue pour être à la fois évolutive et accessible, de sorte que même les partenaires ayant une expérience limitée, voire nulle dans l'utilisation des technologies de l'information puissent être rapidement formés à l'utilisation des outils. Les commentaires des partenaires font également partie intégrante du processus de développement technique.

Les principaux enseignements tirés des deux dernières années de collaboration avec des partenaires ont mis en évidence un certain nombre d'améliorations nécessaires. Pour remédier au mieux à ces problèmes, Cadasta s'est associé avec Esri pour développer et lancer la plate-forme Cadasta 2.0.

Ainsi, Cadasta est en mesure de fournir des services plus robustes, évolutifs et flexibles aux partenaires, tout en maintenant son engagement en

matière d'accessibilité, de sécurité et de confidentialité. Parmi les améliorations spécifiques apportées à la plate-forme Cadasta 2.0, citons :

- l'amélioration des outils mobiles de collecte de données ;
- une plus grande flexibilité pour explorer et gérer les données collectées et stockées ;
- la possibilité de créer des applications Web ;
- la possibilité de créer des relevés imprimés pour des ensembles de données individuels en vue de leur examen et de leur approbation, ou de la reconnaissance formelle des droits par les autorités ;
- des outils de cartographie plus riches pour la visualisation de données et la conception de cartes personnalisées ;
- l'amélioration des capacités d'importation et d'exportation à partir d'une plus grande variété de formats de données ;
- la possibilité de combiner des cartes avec du texte narratif, des images et du contenu multimédia pour créer des applications Web ainsi que des histoires convaincantes et conviviales.

Depuis juillet 2018, l'équipe de Cadasta a intégré toutes les données hébergées à la nouvelle plate-forme Cadasta 2.0. et travaille à des programmes de formation pour les partenaires actuels et nouveaux. La plate-forme 2.0 sera lancée le 27 mars 2019 à Washington, pendant la conférence de la Banque Mondiale sur le foncier et la pauvreté. Des questions ? Contactez la Fondation Cadasta à info@cadasta.org.

Anne Girardin

D'après le texte d'Olivier Roick,
Développeur Principal, Fondation Cadasta
[https://cadasta.org/
cadasta-2-0-esri-supported](https://cadasta.org/cadasta-2-0-esri-supported)

■ **Logiciel SCENE 2018 de FARO® pour la sécurité publique, la médecine légale et la police scientifique**

FARO® fournisseur de technologie de mesure et d'imagerie 3D pour la sécurité publique, la médecine légale et la police scientifique, annonce le lancement de SCENE 2018, un logiciel entièrement intégré, spécialement conçu pour la gamme des scanners laser Focus de FARO. Il comporte des avancées importantes pour la numérisation 3D des données de la réalité et permet aux enquêteurs travaillant sur les scènes de crimes, d'accidents et d'incendies et autres professionnels de la sécurité d'améliorer la qualité et la rapidité de leur numérisation, de la documentation, de la reconstitution et de l'analyse des preuves. Il est désormais possible de capturer les zones qui présentent un intérêt majeur de manière très détaillée et à grande distance. Le FARO Laser-HDRTM, une autre innovation brevetée de FARO, perfectionne les techniques HDR classiques en améliorant les photographies grâce à l'intensité du laser du scanner Focus. Enfin, SCENE 2018 continue d'améliorer l'expérience utilisateur avec la réalité virtuelle. Le module de réalité virtuelle permet aux utilisateurs de créer facilement les environnements immersifs en 3D des scènes de crime, d'accident, d'incendie ou d'incidents de sécurité, qui ont été numérisées.

■ **SPECTRA PRECISION devient SPECTRA GEOSPATIAL**



SPECTRA PRECISION, fournisseur de produits et solutions pour le géopositionnement, change de nom et devient SPECTRA GEOSPATIAL. La gamme de produits reste la même avec des récepteurs GNSS, des stations totales, des logiciels associés, etc.



■ Des étudiants de l'ENSG au 4L Trophy

Du 23 février au 3 mars 2019 se déroulera le 4L Trophy, évènement étudiant à but humanitaire, lançant plus de 1 500 équipages sur les routes du Maroc pour apporter plus de 20 kg de matériel scolaire et sportif par voiture. Cette année l'association "4L aimants" envoie un équipage pour représenter l'ENSG et Paris 1 Panthéon Sorbonne. L'ENSG est l'école de la géomatique liée à l'IGN qui diplôme plus de 12 formations dont un cursus ingénieur, ainsi que la licence Pro que nous poursuivons cette année. L'équipage 1491 sera composé du pilote Jean-Charles Massonnet et de son copilote Olivier Henius tous deux passionnés de mécanique. Pour mener à bien cette aventure, nous avons besoin de sponsors prêts à collaborer dans ce projet humanitaire hautement médiatisé. Nous voulons permettre non seulement aux grosses entreprises de nous accompagner, mais aussi aux plus petites structures via une cagnotte participative pour les collaborations plus modestes. Toutes les participations sont les bienvenues et nous mettrons en valeur tous les organismes nous ayant aidés dans ce merveilleux évènement. Pour nous soutenir, vous pouvez nous demander notre dossier de sponsoring, nous aider via notre cagnotte participative ou tous simplement aller voir nos réseaux sociaux et parler du 4L Trophy à ceux qui ne le connaissent pas !

► **Soutenez notre cagnotte participative en ligne sur : www.KissKissBanBank.com**

Vous pouvez aussi nous suivre sur Instagram : @4L_Aimants_2k19
Nos contacts : 4l-aimants@ensg.eu et 06 47 14 04 08

■ Ferah Pirlanda Köksal nouvelle représentante de la FIG European Young Surveyor au CLGE



Le Comité de Liaison des Géomètres Européens (CLGE, *Council of European Geodetic Surveyors*) recherchait un nouveau représentant du réseau européen de la *FIG Young Surveyor* pour participer aux réunions de son conseil exécutif pour 2019 et 2020 pour remplacer Diana Becirevic qui a tenu ce rôle de 2015 à 2018. La candidature de Ferah Pirlanda Köksal ayant été acceptée, elle devient donc cette nouvelle représentante.

■ L'INRAP de Caen et l'INSA de Strasbourg, lauréats du prix SCHLUMBERGER 2019

L'Institut national de recherches archéologiques préventives de Bourguebus et l'INSA de Strasbourg ont reçu le prix Schlumberger pour leur projet REFUGE 44. <https://www.echosciences-normandie.fr/communautes/le-dome/articles/refuge-44-prix-musee-schlumberger-2018>

L'objectif de REFUGE 44 est de rendre virtuellement accessible à l'étude archéologique mais aussi à la visite du grand public, une carrière à Fleury-sur-Orne qui a été en 1944 le lieu de vie de familles à l'abri des bombardements.

L'accès à ce lieu a été condamné juste après la guerre et il n'a été visité qu'exceptionnellement en 1984 et 2014. On y retrouve donc des traces de vie intactes d'il y a plus de 70 ans (jouets d'enfants, fioles de médecin, vélo, etc.) un peu comme un "Pompéi de la Seconde Guerre mondiale".

L'acquisition des données photogrammétriques et lasergramétriques et leur intégration dans un module de réalité augmentée ont fait l'objet de travaux de fin d'études d'élèves ingénieurs de la spécialité Topographie de l'INSA.



Samuel Guillemain (INSA), Matthieu Verstaen (nouvel ingénieur diplômé de l'INSA), Cyril Marcigny (INRAP) et Pierre Grussenmeyer (INSA)

■ La Telescop à la Maison de la Télédétection

La Telescop, première société coopérative et participative (scop) spécialisée en télédétection, cartographie et appui aux politiques publiques, a démarré son activité à l'automne 2018 dans les locaux de la Maison de la Télédétection à Montpellier où le projet de création de la société a vu le jour. L'équipe de cette société est issue des unités de recherche montpelliéraines (UMR Tetis, UMR EspaceDev) et des dispositifs nationaux d'accès aux données hébergés à la Maison de la Télédétection (Geosud, Theia). A l'interface entre la communauté scientifique et les utilisateurs finaux, La Telescop bénéficie, grâce au réseau et au rayonnement scientifique des acteurs de la Maison de la Télédétection, d'un contexte favorable pour répondre aux besoins des acteurs publics et privés en données spatialisées dans les domaines de l'environnement, l'agriculture et l'aménagement du territoire.



Bastien Nguyen Duy-Bardakji, fondateur et gérant de La Telescop

© CD / La Telescop

Les géomètres et le BIM à l'honneur durant les journées de la topographie 2018

Les 19, 20 et 21 septembre derniers s'est tenue la 15^e édition des journées de la topographie à l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Strasbourg. Dans ce cadre, vingt-six étudiants de l'INSA ont pu soutenir leur Projet de fin d'études devant des professionnels venus voir leurs soutenance et présenter leurs solutions et matériels lors du salon des exposants. Après les mystères du BIM (Building Information Modeling) en 2015, la conférence s'est cette fois-ci tournée vers la place et le rôle du géomètre dans un projet BIM et plus précisément la fonction de garant de la maquette numérique.

Le salon des exposants est bien achalandé

Le salon des exposants a aussi ouvert ses portes avec un grand nombre d'entreprises telles qu'Azimut Topo, Exagone, Feno, Geofit, Geopixel,



Geosat, Leica, Positics, Sitech, Sixense Soldata, Technodigit Reshaper, Trimble, ou encore Viametris.

Pendant que certains se renseignaient auprès des exposants sur les nouveautés en termes d'instruments, de solutions logicielles, d'autres profitaient du système de réalité virtuelle de la spécialité topographie pour s'immerger dans les modèles 3D réalisés par les étudiants de la spécialité sous l'encadrement de l'équipe pédagogique.

Les conférences sont passionnantes

Ces journées se sont ensuite penchées sur la problématique du BIM (*Building Information Modeling*) au cours d'une conférence tenue par Bertrand Clergeot, président de la commission technique de la mesure pour l'OGÉ, Guillaume Berson, responsable de l'innovation au sein de *TT Géomètre-Expert*, Nicolas Brigand ingénieur-architecte associé chez *rhb architectes* et Wassim Zargouni, BIM manager chez *OTE Ingénierie*. Faisant suite à la conférence des journées de la topographie 2015, le sujet du BIM a cette fois été abordé pour définir la position du géomètre au sein de ce dernier, et plus spécifiquement la fonction de garant de la maquette numérique.

Le BIM s'est grandement généralisé ces dernières années. Aujourd'hui pratiqué par environ 20 % des géomètres-experts en France, entre autres grâce au plan de transition du bâtiment numérique, son activité a été multipliée par cent en seulement 10 ans. Mais qui dit emploi généralisé et nouveauté dit également lacunes légales et réglementaires surtout concernant la propriété intellectuelle. Il n'existe en effet aucune



réglementation concernant le BIM. Sa pratique est alors encadrée par des contraintes contractuelles, telles que la charte BIM, le cahier des charges du BIM, la convention BIM et le contrat de gestion du BIM aussi appelé *BIM management agreement*. Suite à cette lacune juridique, il est naturel de se poser la question de la responsabilité des différents acteurs et d'élire un garant de la maquette numérique. La conférence tenue le vendredi 21 septembre a permis d'apporter quelques réponses à cette problématique.

Un autre membre de l'équipe BIM a aussi fait surface lors de cette conférence : le BIM manager, un poste flou mais heureusement éclairé par W. Zargouni. Il s'agit d'un responsable de projet, qui assure la coordination et la gestion de tous les acteurs et actions liés au projet, et est, entre autres, responsable de la formation des membres de l'équipe de travail. Il doit avoir une vue d'ensemble du projet et une certaine expérience dans le domaine de la construction, afin de tirer le meilleur de son équipe. Chargé de vérifier la conformité de la maquette BIM avec le projet, il peut tout à fait endosser le rôle de responsable de cette dernière, mais ne sera pas en mesure d'en garantir la précision.

Le géomètre faisant autorité auprès du juge en termes de spécialiste de la mesure, il est le seul à pouvoir garantir cette précision. Mais cette garantie n'est valable que sous réserve de contrôle. Ainsi, si le géomètre est le seul à être capable de certifier la précision de la maquette numérique, faudrait-il qu'il



existe une certification pour justifier cette précision ? C'est une question qui subsiste au niveau légal.

Il semblerait que la responsabilité vis-à-vis de la maquette BIM reste assumée par tous les membres de l'équipe de travail et non par un seul collaborateur, comme le géomètre. Ce dernier ne peut garantir plus que la qualité de son propre travail, à savoir la précision de la maquette numérique, qu'il s'agisse de son géoréférencement, de la qualité des données acquises ou de la modélisation qui s'en suit.

Nous clôturerons sur les mots de N. Brigand qui nous a expliqué que chaque acteur du BIM a la responsabilité de s'assurer de la qualité et de la justesse du support de son travail à chaque étape

du processus. Car certes le géomètre, expert ou non, ainsi que l'ingénieur topographe sont des acteurs nécessaires au projet BIM et à sa qualité, mais ils ne sont pas les seuls impliqués.

Félicitations aux nouveaux diplômés

Après des discours bienveillants à l'égard des futurs diplômés ingénieurs topographes, les participants, membres des jurys, étudiants de toutes les années de formation, ont partagé un verre de l'amitié pour clôturer ces JDT 2018 ! ●

► **Comité d'organisation des journées de la topographie 2018 : Sébastien Vergnol, Laura Sanson, Alexandra Spofford et Olivier Montauban.**

Agenda des manifestations

- 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 8 au 10 avril, **Commercial UAV Expo** à Amsterdam, Pays-Bas <https://www.expouav.com/europe/>
- Du 9 au 11 avril 2019, **Ocean Business 19 à Southampton, UK** <https://www.oceanbusiness.com/>
- Du 22 au 26 avril, **FIG 2019** à Hanoï <http://www.fig.net/fig2019/>
- Du 13 au 17 mai 2019, **European Space Agency's Living Planet**

Symposium à Milan, Italie - <https://lps19.esa.int/QuickEventWebsitePortal/living-planet-symposium-2019/website>

■ Du 15 au 17 mai, **4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring** à Athènes, Grèce - <http://jisdm2019.survey.ntua.gr/>

■ Les 21 et 22 mai, **GeoBusiness 2019** à Londres, UK <https://www.geobusinessshow.com/>

■ Du 8 au 18 juillet, **assemblée générale de l'UIGG à Montréal, Canada** <http://iugg2019montreal.com/>

■ Du 1^{er} au 5 septembre 2019, **CIPA 2019, 27th International CIPA Symposium, Documenting the past for a better future** à Avila, Espagne <http://www.cipa2019.org/>

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BOSSER Pierre,
professeur associé, ENSTA Bretagne,
Brest

BOTTON Serge,
ingénieur, ENSG Marne-la-Vallée

CLÉDAT Emmanuel,
doctorant, EPFL (Suisse)

KOEHL Mathieu,
maître de conférences, INSA
Strasbourg

LEQUEUX James,
astronome émérite à l'Observatoire
de Paris

MAINAUD DURAND Hélène,
ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique,
ingénieur topographe, CERN Genève

MOPIN Irène,
ingénieur recherche, ENSTA Bretagne,
Brest

MOREL Laurent,
professeur des universités, ESGT Le
Mans

PANTAZIS N. Dimos,
professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent,
directeur du CESBIO, Toulouse

REIS Olivier,
ingénieur, traducteur Sarreguemines

ROCHE Stéphane,
professeur, Université Laval, Québec

TOUZÉ Thomas,
dr. ing. géomètre, HEIG-VD

TROUILLET Michel,
ingénieur topographe, Lyon

Font partie du comité de lecture les membres du comité de rédaction et la rédaction (la directrice des publications et son adjoint, le rédacteur en chef et son adjoint), voir la liste en page 1, sommaire.

Intergeo® 2018 à Francfort

■ Olivier REIS



Comme quoi, le diable se niche toujours dans les détails.

Le décor étant ainsi planté, que faut-il retenir de l'édition 2018 ? S'agissant du congrès, on observera que beaucoup de conférences ont été prononcées en allemand et que toutes, loin s'en faut, ne sont pas concernées par la traduction simultanée, réservée à quelques interventions assez ciblées. Cela réduit d'emblée le nombre d'auditeurs, mais révèle simultanément qu'Intergeo®, en dépit de sa dimension internationale, reste une émanation d'un événement plus ancien qui a existé de 1872 à 1994 et s'appelait le "deutscher Geodätentag", littéralement le jour des géodésiens allemands. On notera ensuite que la force de cette manifestation – présenter trois jours durant l'état de la profession dans toutes ses composantes et dans toute sa diversité – peut constituer une faiblesse dans le même temps, puisqu'il est de plus en plus difficile d'avoir une vue d'ensemble de la situation. Est-ce un bien ou un mal ? Libre à chacun de se faire son opinion à ce sujet. Toujours est-il que la plupart des congressistes – et des visiteurs de manière générale – se concentrent sur ce qui les intéresse ou les concerne directement dans les différents domaines abordés. Pour cette année, on citera pêle-mêle le passage au tout numérique, l'administration en

Francfort-sur-le-Main, simplement appelée Francfort en général, est l'une des principales places financières d'Europe. C'est le siège de la Banque centrale européenne, la BCE, et de la Deutsche Bundesbank, la banque centrale de la République fédérale d'Allemagne. Les gratte-ciel qui ponctuent le quartier des affaires, à deux pas du centre-ville, symbolisent sa puissance économique et lui ont valu le surnom de Mainhattan. Riche métropole dont l'aire urbaine regroupe près de 2,5 millions d'habitants, c'est aussi un nœud de communication important, de par sa situation au cœur du pays et de l'Europe. Son aéroport est le plus fréquenté d'Allemagne, sa gare centrale n'a rien à lui envier et ses autoroutes sont perpétuellement saturées. Cité natale de Goethe, c'est enfin une ville de foires et de salons où s'est déroulée l'édition 2018 d'Intergeo®, du 16 au 18 octobre, en ayant le redoutable privilège de succéder au Salon du livre, mondialement connu.

Comme tous les ans à l'automne, les topographes du monde entier se sont donné rendez-vous à Intergeo® pour y tenir salon. Les dieux de la météo leur ont été particulièrement favorables cette année. Existant depuis 1995 sous sa forme actuelle, cette manifestation itinérante se tient chaque année dans une ville ou plutôt une métropole différente (proximité avec un aéroport international oblige), combine un congrès au programme riche et varié, organisé par l'association allemande de géodésie, d'information géographique et de gestion du territoire DVW, et une exposition dont la superficie ne varie plus guère, alors que le nombre d'exposants continue à croître au fil des ans. Aussi, il est opportun, sinon conseillé, de consulter le site Internet du salon avant de s'y rendre, histoire de ne pas perdre son temps sur place, en cherchant à s'y retrouver parmi les 635 exposants recensés pour ce cru 2018. C'est beau-

coup, mais il convient de préciser que le salon abritait deux expositions en devenir sous son aile : *Smartcity solutions*, consacrée aux villes intelligentes et *Interaerial solutions*, dévolue aux drones. Chacune d'entre elles regroupait près de 150 entreprises, occupant souvent des surfaces réduites, tandis qu'un site extérieur était réservé aux évolutions commentées des engins volants en démonstration. Véritable crique blottie entre d'immenses halls, ce lieu permettait aussi aux visiteurs de se sustenter tout en profitant du spectacle, mais un petit vent frisquet a singulièrement clairsemé les rangs des spectateurs, le jour où j'ai été l'un d'entre eux. C'était pourtant une bonne idée de situer cette aire de vol à la jonction entre les bâtiments accueillant respectivement l'exposition et le congrès, ce qui en faisait un passage obligé pour les quelque 1 400 participants à ce dernier, venus des quatre coins de la planète.





ligne (ou *e-government*), les BIM (ou maquettes numériques), les villes intelligentes (*smart cities... and villages*, la ruralité y étant désormais associée), les drones, les scanners, le cloud, la photogrammétrie et la télédétection, le *big data*, le GNSS, la réalité virtuelle et la réalité augmentée, sans oublier ce qu'on pourrait appeler l' "industrie géospatiale 4.0 " ; aux contours encore un peu flous, mais qui consiste en une automatisation massive à base d'interconnexion générale et d'intelligence artificielle sur fond d'Internet des objets (IoT en anglais, *Internet of things*). Là, on entre véritablement de plain-pied dans le futur et on trouve peut-être des éléments de réponse à l'interrogation formulée précédemment. Dans l'avant-propos d'Intergeo® report, programme officiel de la manifestation, le président de la DVW estime pour sa part que les informations géographiques sont l'ADN de la transformation numérique. D'où l'importance d'être ou de devenir des acteurs incontournables de la saisie et de la gestion de telles informations, ce qui trace assurément une perspective pour l'avenir, tout au moins en termes de positionnement stratégique. Pour le reste, et notamment les multiples questions que soulève la transformation numérique, on en reparlera assurément au cours des prochaines éditions d'Intergeo®.

Venons-en au salon à présent. Regroupés sur les deux niveaux de l'immense bâtiment 12 du site, ce qui signifie donc qu'une dizaine d'autres bâtiments étaient inoccupés et donne une petite idée de la dimension des lieux, les stands de l'exposition réservaient quelques surprises. Les nostalgiques des années 1980, assez nombreux vu l'âge moyen des visiteurs, se sont ainsi pressés devant une DeLorean – la voiture de "Retour vers le futur" – au toit hérissé de capteurs. Tous les supports de capteurs

n'étaient pas aussi originaux, même si la gamme était assez étendue, allant du blindé de la Bundeswehr, l'armée allemande, au deux-roues le plus modeste en passant par les inévitables chariots ferroviaires dédiés à la mesure et à l'inspection du réseau ferré. Des capteurs de toutes sortes, on en trouvait aussi montés sur des drones de tous types et de toutes tailles, au service d'un éventail toujours plus large d'innovations et d'applications. On observera ici, c'est un sentiment délivré par un exposant, qu'Intergeo® est une véritable mosaïque de marchés de niches aux destins très divers. Si certaines apportent le succès à ceux qui les exploitent, d'autres ne leur permettent pas de concrétiser leurs espoirs, voire se révèlent être des échecs cuisants. Et certaines situations apparemment bien établies vacillent aussi au fil des ans. Il arrive que des acteurs importants d'un marché n'anticipent pas son évolution ou l'arrivée de nouveaux concurrents et finissent par disparaître du paysage. A l'inverse, on croise également des entreprises que l'on ne s'attendait pas à trouver là. C'est le cas par exemple d'Amazon Web Services, proposant notamment des services de stockage dans le cloud.



Intergeo® en quelques chiffres

Date : du 16 au 18 octobre 2018 à Francfort, parc des expositions
Congrès : 1 400 participants, environ 200 orateurs
Exposition : 635 exposants issus de 40 pays environ, 19 000 visiteurs venus de plus de 100 pays
2019 Stuttgart (du 17 au 19 septembre)
2020 Berlin (dates encore inconnues)
2021 Francfort (dates encore inconnues)
Pour plus d'informations :
<https://intergeo.de/intergeo-en/>

L'exposition d'Intergeo®, c'est un peu un village qui se reconstruit chaque année, avec ses arrivées et ses départs, ses quartiers en plein boom et ses artères centrales affichant leur prospérité, alors que quelques rues plus loin, certains essaient de gagner leur place ou perdent doucement pied. Ces dernières années, un grand chantier est en cours, le village devient intelligent et son ciel bourdonne de drones multi-usages. Le profil des villageois change aussi avec le temps, le multiculturalisme progresse (chaque année un peu plus, semble-t-il) et le village global prend ici tout son sens. En apparence, lorsque l'on n'y passe que quelques heures en qualité de simple badaud, la concorde semble régner. Pour qui en connaît les coulisses toutefois, la vérité est un peu différente. Mais peu importe. L'essentiel est que ce village continue à exister et à accompagner la marche du progrès technique en permettant aux acteurs de la topographie, quels qu'ils soient, de démontrer tout leur savoir-faire dans les domaines de compétence qui sont les leurs, aussi divers soient-ils.

L'an prochain, cap au sud, puisque c'est à Stuttgart, haut-lieu de l'industrie automobile, que le village sera monté, pour l'édition 2019 d'Intergeo®, du 17 au 19 septembre. ●

SIG 2018

la conférence francophone Esri

La dernière conférence des utilisateurs francophones "SIG 2018" organisée par Esri France s'est déroulée les 10 et 11 octobre 2018 aux Docks de Paris. Cette édition s'est déroulée pour la deuxième fois dans ce nouvel environnement et a même été étendue à des salles supplémentaires par rapport à l'an passé. De plus en plus d'utilisateurs d'outils SIG et périphériques métiers connectés se sont rencontrés pour discuter des évolutions dans le monde de la géomatique.

Après les sessions plénières et les sessions techniques, plus de 200 utilisateurs ont témoigné à travers des communications (disponibles sur le site : <https://sig2018.esrifrance.fr/communications-2018.aspx>) dans les différentes salles de conférence. Près de quatre-vingt exposants, dont l'AFT, ont quant à eux animé l'espace central et ont noué des contacts avec ces mêmes utilisateurs tout en transmettant leur savoir-faire aux nombreux géomaticiens présents.

Les grands témoins étaient très impliqués et leurs messages très intéressants : toujours en relation avec la géographie et la cartographie : ainsi Akim Oural (conseiller à la Métropole de Lille) a parlé d'Hypervision pour les SIG et notamment de sa vision des villes du futur, Yann de Pietro (Nespresso) a défendu le principe d'un cycle de production de café vert à travers le monde, Allain Bougrain-Dubourg (Ligue de protection des oiseaux) a rappelé, s'il le fallait encore, la fragilité du monde animal et les dégâts causés par l'homme sur la nature. Son exposé parsemé de nombreuses anecdotes ont passionné l'auditoire.

Les concours "classiques" de posters, "story maps", Cartocréa de créations



Retrouvez la session plénière à : <https://sig2018.esrifrance.fr/session-pleniere-2018.aspx>

cartographiques artistiques ainsi que les "24h du SIG" ont toujours connu un vif succès. L'AFT a offert de nombreux lots pour récompenser les lauréats.

Le nuage de mots construit sur la base de mots clés des communications utilisateurs montre la diversité des thématiques présentées et des intérêts partagés.



Mais quelles sont les nouveautés et évolutions des SIG proposées lors de ces conférences ?

Alors que la plate-forme ArcGIS pro évolue très rapidement pour devenir le standard de la gamme Esri de demain, les applications des SIG progressent et se positionnent dans d'autres secteurs du numérique en pleine révolution. Ainsi ArcGIS Hub est le composant de la plate-forme ArcGIS qui permet

la traduction de volontés politiques en actions concrètes mettant en œuvre des initiatives citoyennes et contributives basées sur les données ouvertes (*Open Data*) de la collectivité. À l'aide de la notion de scène web (ouverte et standardisée) et grâce au format OGC de *streaming* de données 3D "I3S", la plate-forme ArcGIS permet un usage mixte de données 2D et 3D. Par ailleurs, de nouvelles synergies Esri-Autodesk sont proposées dans le cadre de la convergence BIM-SIG. Enfin ArcGIS offre des traitements Big Data et dispose d'un sous-ensemble de techniques de *Machine learning* (ML) intrinsèquement spatiales permettant aux *DataScientists* de manipuler des données géographiques. Plus de données, plus d'outils, plus de traitements, plus de solutions, plus de médias, plus d'interconnexions entre systèmes, les défis des SIG de demain sont en passe d'être relevés.

Une fois de plus, ces rencontres ont mis en évidence les avancées fulgurantes des technologies du numérique dans lesquelles les SIG gardent une place de choix et s'en trouvent de nouvelles. L'AFT a, une fois de plus à travers sa participation à cet événement incontournable, contribué à la diffusion de la connaissance topographique et étoffé quelque peu sa liste d'abonnés notamment dans la communauté des géomaticiens. ●

Mathieu KOEHL

FESTIVAL INTERNATIONAL DE GÉOGRAPHIE DE SAINT-DIÉ-DES-VOSGES

La géopolitique du local

■ Jean-Pierre MAILLARD

La 29^e édition du festival international de géographie (FIG) s'est déroulée du 5 au 7 octobre 2018. Une nouvelle fois, dans une sous-préfecture de Lorraine, les géographes sont sortis de leurs salles de cours ou de leurs colloques, les scolaires ont visité le salon de la géomatique et le public a profité d'un grand moment de culture populaire. Les lois de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (MAPTAM), et celle de la nouvelle organisation territoriale de la République (NOTRe) ayant significativement modifié le cadre administratif du pays, le thème "La France demain", celui de la disparition de la primauté des communes et de la prépondérance de quatorze métropoles cernées de zones "blanches".

En moins de deux ans le nombre des régions a été divisé par deux, la carte des communautés de communes et d'agglomération a été redessinée en provoquant de nombreuses fusions de communes. Dans ces conditions le regard que notre société porte sur le territoire est impacté. Ce thème, essentiellement politique pose la question de l'identité de la France, en sachant bien qu'elle est fluctuante. Le FIG 2018 n'a pas hésité, dans sa pratique d'ouverture et d'engagement, à chercher à éclairer la problématique.

Compte tenu de sa contribution à ses objectifs, notamment la valorisation du rôle du patrimoine en faveur de la connaissance partagée, le festival a reçu le label "Année européenne du patrimoine culturel 2018."

Le FIG 2018 a été présidé par Laure Adler, journaliste incontournable du service public et écrivain. Eric Fotorino, ancien directeur du journal *Le Monde*, actuellement à la tête de l'hebdomadaire *Le 1*, chargé de la présidence du salon du livre, et Thierry Paquot, philosophe, ancien professeur des universités, appelé comme grand témoin, sont les autres personnalités mobilisées. On a aussi pu également rencontrer d'autres participants médiatisés tels Hubert Védrine, Aurélie Filippetti et les trois piliers du FIG, Christian Pierret, président fondateur, David Valence, maire de Saint-Dié-des-Vosges, et Gilles Fumey, le président de l'association pour le développement du FIG (ADFIG).

La carte IGN

L'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) a présenté dans le hall de la gare SNCF sa 20^e carte au sol, sur 36 m². Cette fois il a proposé au regard des voyageurs et des festivaliers de remonter le temps en installant un assemblage de quatre cartes de la région de Saint-Dié-des-Vosges illustrant quatre siècles

de cartographie : respectivement celle de Cassini, celle d'État-major, celle au 1/100.000^e pour finir avec la carte de randonnée, la plus récente. L'assemblage renvoie au site Internet du Géoportail qui permet ce voyage dans l'Histoire. On y remarquera que la surface des forêts a beaucoup varié et qu'aujourd'hui elles sont bien plus couvrantes qu'à la fin du XIX^e siècle au moment où l'exploitation agricole occupait une population rurale très nombreuse. Les médias s'inquiètent souvent, à juste raison, de la consommation urbaine du sol qui supprime la surface naturelle d'un département tous les dix ans. En revanche ils devraient souligner que la forêt gagne dans de nombreuses régions pour des causes foncières ou de désintérêt économique des exploitants agricoles, dont le nombre est sans cesse diminuant, de ce fait la photosynthèse s'en porte mieux.

Le prix Vautrin-Lud 2018

Comme les mathématiques et d'autres domaines scientifiques, la géographie n'est pas récompensée par un prix



Le brunch au moment des amuse-gueule

© Université de Lorraine



Dessin d'humeur de Catherine Créhange

Nobel. De longue date, avec l'aval de la fondation éponyme, le prix Vautrin-Lud, décerné par le FIG, équivaut au "Nobel de géographie". Le prix 2018 a été remis à Jacques Lévy qui est un géographe français, ancien élève de l'école normale supérieure de Cachan et professeur à l'école polytechnique de Lausanne (Suisse) depuis 2004. Il a fortement influencé la pensée géographique au cours des dernières décennies. Il a créé en 1975, avec Christian Grataloup, la revue *Espaces Temps* qui a largement contribué au rapprochement de la géographie et des sciences sociales. Ses travaux novateurs portent sur l'espace politique, la ville et l'urbanité, la mondialisation et la cartographie. Il a codirigé le dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés qui, selon Jean-Christophe Gay, constitue "un renouvellement majeur du vocabulaire des sciences sociales de l'espace et une mise en cohérence du discours géographique". Jacques Lévy est un familier du FIG puisqu'il y a déjà participé une vingtaine de fois. Il est le sixième Français à recevoir le prestigieux prix.

XYZ félicite le récipiendaire et est très honoré d'avoir publié un article de Jacques Lévy dans un précédent numéro de la revue.

Le salon de la géomatique

Remisé en 2017 au rang de vitrine de la géographie, le salon de la géomatique a retrouvé son rang grâce à

la détermination d'Elise Ladurelle-Tikry permanente de l'association française de l'information géographique (AFIGEO) et le soutien de Victoria Kapps, la nouvelle directrice du FIG. Les participants ont notamment retrouvé les stands de l'IGN, du Ministère de l'Europe et des affaires étrangères, de la société GEOFIT, de plusieurs universités, et bien sûr, de l'AFIGEO. Avec le 30^e anniversaire du FIG en 2019, un regain du salon de la géomatique est annoncé. Pour sa part l'université de Lorraine s'est inscrite dans cette thématique en invitant les intéressés à un brunch géomatique.

Le brunch géomatique

Labellisé par le programme Lorraine Université d'Excellence un rendez-vous gourmand a été organisé avec "le goût de partager des idées". C'est ainsi qu'un temps d'échange et de partage s'est tenu sur le sujet "GPS, géolocalisation, systèmes d'information géographique : la géomatique aujourd'hui et demain". Animé par Nicolas Dorkel du laboratoire de géographie LOTERR, l'estrade a réuni Gilles Simon du laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications (LORIA), Pierre Bazile de l'AFIGEO, Christophe Chantraine de la société de géomètres-experts GEOFIT et l'écrivain Lilyane Beauquel dans le rôle de Candide. La participation de l'AFIGEO et de GEOFIT a montré que les géographes sont de

plus en plus preneurs de données géomatiques qui procèdent de l'acquisition et du traitement en mode numérique. Au-delà de la communication sur l'état des connaissances dans le domaine, la formule vise également à permettre des rencontres entre scientifiques, acteurs socio-économiques et même artistes. Le côté convivial de la rencontre est renforcé par la découverte, au moment du café, des dessins d'humeur de Catherine Créhange qui a bien voulu en offrir un à XYZ. La volonté d'ouverture de l'université de Lorraine a été démontrée en choisissant d'organiser le brunch dans les locaux de l'association Turbulences qui accompagne, à Saint-Dié-des-Vosges, des handicapés adultes en prenant soin de ne pas laisser certains handicaps de côté. C'est ainsi que la visite de la maison Mosaïque qui reçoit l'équipement déodatien de l'association Turbulences a clos le brunch.

Les pays invités

Les cinq pays du nord de l'Europe (Danemark, Suède, Norvège, Finlande et Islande), même s'ils ont chacun leurs spécificités, forment aux yeux du public français un ensemble cohérent : la Scandinavie. Le "modèle suédois" des années 1980 et l'actuelle "flexi-sécurité" à la danoise nourrissant à l'occasion les débats politiques de notre pays, le FIG a proposé de les mieux connaître et de s'interroger sur le modèle nordique de développement durable sans oublier de faire la part belle aux produits de leurs pays au salon de la gastronomie. De même le salon du livre a tenu à promouvoir la qualité de la littérature nordique qui ne fait pas de différence entre roman et roman policier. Avec une production éditoriale traduite en français qui représente moins de 5 %, les auteurs nordiques ont trouvé à Saint-Dié-des-Vosges un moyen supplémentaire de faire connaître leurs œuvres. ●

Rendez-vous est pris pour la 30^e édition du FIG qui se déroulera les 4, 5 et 6 octobre 2019 sur le thème des migrations, les Caraïbes étant la région invitée.



La 9^e conférence internationale sur le positionnement et la navigation en intérieur

“L’avènement des systèmes de positionnement terrestre, de l’internet des objets et des réseaux de capteurs humains offre de nouvelles fonctionnalités de navigation et définit un nouveau paradigme pour les solutions de positionnement et de navigation en intérieur. L’environnement, dans lequel la technologie de navigation devrait fonctionner, s’est étendu aux espaces intérieurs difficiles, au contexte de la mobilité des biens et des personnes. Il n’existe ainsi pas de solution globale et simple.

Chaque année, IPIN (Indoor Positioning and Indoor Navigation) réunit plus de 400 experts industriels et universitaires en informatique, électronique et géodésie pour relever ce défi. Sur les traces de nos collègues japonais, nous vous souhaitons la bienvenue à l’IPIN 2018 en France pour sa neuvième édition, afin de discuter de questions scientifiques et industrielles, de participer à des compétitions de géolocalisation hors du lieu de la conférence et de profiter du patrimoine historique et culturel de Nantes.” C’est par ces mots de bienvenue que Dr Valérie Renaudin et l’équipe GEOLOC,

IFSTTAR Nantes (Figure 1) accueillent les participants parmi lesquels les représentants de votre Association et de votre revue XYZ, partenaire média de l’événement.

IPIN 2018 en un clin d’œil

Le cycle de conférences IPIN a été lancé en 2010 à Zurich, ces événements sont dédiés à la localisation en intérieur. Cette année, des compétitions à l’intérieur du centre commercial Atlantis le samedi 22 septembre ont introduit l’événement, suivies par quatre jours de conférences et d’expositions du 24 au 27 septembre à la cité des Congrès de Nantes.

Compétition de localisation à l’intérieur

Nous rappelons que votre revue a rendu compte des opérations de topographie préliminaires à cette compétition dans le numéro 155 pages 17-21, ces travaux furent également l’objet d’une communication lors du Forum d’Anglet le 29 mars dernier.

Cette compétition (Figure 2), une première de cette ampleur, a été menée suivant 4 axes :

- Trajet 1 : positionnement incluant la



Figure 2. Acquisitions en temps réel

caméra (en temps réel) avec 5 équipes. L’équipe ARIEL-2 de l’université Ariel, Israël a remporté le concours.

- Trajet 2 : positionnement n’incluant pas la caméra (en temps réel) avec 12 équipes. L’équipe SONY, de la société Sony, Japon est arrivée première.
- Trajet 3 : positionnement par smartphone (post-traitement de données déjà enregistrées) avec 17 équipes. L’équipe Whu de l’université du Wuhan en Chine a gagné ce concours.
- Trajet 4 : positionnement par IMU (Inertial Motion Unit) monté sur pied (post-traitement de données déjà enregistrées) avec 5 équipes. De nouveau, l’équipe chinoise WHU a gagné sur ce trajet.

La longueur des parcours était de plus de 800 m en incluant 3 étages et quelques arrêts (ZUPT Zero Velocity Update). Les performances obtenues en temps réel furent de l’ordre du décimètre pour le trajet 1, du demi-décimètre pour le trajet 2 et de l’ordre du mètre en post-traitement pour les trajets 2 et 3.

Les tutoriaux, les conférences, les sessions parallèles

Deux présentations d’exception ont tenu en haleine les intéressés. La première intitulée “Si vous me dites ce que vous regardez, je pourrais vous dire où vous êtes” par Dr Myriam Servières parcourt tous les domaines de la photogrammé-



Figure 1. L’équipe d’organisation

► trie pour déboucher sur le VO (*Visual Odometry*) ou le calcul de la trajectoire de la caméra séquentiellement et le SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) autrement dit les localisation et cartographie simultanées. Le deuxième sujet dénommé "En utilisant les mesures brutes GNSS sur les appareils Android" est exposée par Dr Gaetano Galluzzo. Après les annonces de l'accès aux données brutes sur Android 7 et l'augmentation du nombre de Smartphones recevant Galileo (plus de 60), nous assistons à l'annonce de la bifréquence disponible chez Xiaomi. La GSA (*European Global Navigation Satellite Systems Agency*) met en place groupes de travail, compétition sur le développement d'applications de traitement des données brutes, etc. Les tutoriaux sont disponibles ici : <http://ipin2018.ifsttar.fr/program/monday-24-september/>

Les conférences spécialisées (*Keynotes*) ont permis de sensibiliser les auditeurs, comme "L'accélération de la croissance du marché du positionnement intérieur" par David Vissière de Sysnav. De même Justyna Redelkiewicz de GSA nous parle des "Tendances technologiques en géolocalisation", tandis que Prof. Andrei M. Shkel nous fait découvrir "Les capteurs inertiels MEMS 3D et plus précis". Pour terminer grâce au Dr Laura Ruotsalainen de l'université de Helsinki nous savons tout sur la "Navigation utilisant la vision", quels que soient les capteurs utilisés. Les conférences : <http://ipin2018.ifsttar.fr/conference/keynotes/#c15308> Les sessions parallèles ont couvert tous les domaines de la navigation à l'intérieur. L'utilisation et le traitement de tous les signaux disponibles, visuels, radio-électriques, wifi, lumineux, magnétiques, inertiels, etc. permettent la navi-

gation et le positionnement. Le lecteur est invité à se rendre sur le site de la conférence à l'onglet PROGRAM.

Pour en savoir plus

Une dizaine d'exposants a attiré les congressistes, dans les domaines du GNSS, du positionnement, du traitement. Ceux-ci présentent leurs dernières innovations et solutions.

À la soirée "brisons la glace" le groupe de musique celtique Ghillies a été accompagné des Breizh Jiggers, des interprètes de danse irlandaise. La délicieuse soirée de gala a été pleine de surprises grâce aux "Machines de l'île" de renommés automates géants.

Le prochain IPIN 2019 aura lieu du 30 septembre au 3 octobre à Pise, Italie.

Visitez le site de la conférence :

<http://ipin2018.ifsttar.fr/> ●

Bernard Flacelière

HOMMAGE : Michel Louis (1930 – 2018)

Né le 21 septembre 1930 à Eu (Seine-Maritime), Michel Louis fut élève de l'École polytechnique (X51), intégra le corps des Ingénieurs géographes, et fut diplômé de l'École nationale des sciences géographiques (ENSG).

Il débuta sa carrière à l'Institut géographique national (IGN) en 1956 comme géodésien de terrain au sein de la Direction de la géodésie alors dirigée par Jean-Jacques Levallois. Il participa à diverses missions d'établissement de canevas astronomiques et géodésiques en Afrique. Il introduisit dès 1960 l'utilisation de mesures électromagnétiques de distance dans ces canevas géodésiques.

À partir de 1962, il coopéra avec Jean-Jacques Levallois au développement des utilisations des chambres balistiques développées à l'IGN, notamment dans le cadre de campagnes de géodésie spatiale optique (rattachement des Açores, campagne Europe-Afrique). Il fut chef des travaux spéciaux de géodésie. De 1966 à 1970, il organisa la mission du 12^e parallèle en Afrique, en coopération avec l'*Army Map Service* des USA.

Michel Louis enseigna également à l'École nationale des sciences géographiques et à l'École supérieure des géomètres et topographes (CNAM).

En 1976, il devint chef du service de géodésie, puis directeur de la production de l'IGN en 1981, et enfin directeur général adjoint de 1983 à 1995. Durant ce dernier poste, qu'il occupa pendant 13 ans, il fut un conseiller indispensable pour trois directeurs généraux de l'IGN arrivés de l'extérieur.

Dans le cadre international, Michel Louis fut secrétaire adjoint de l'Association internationale de géodésie (AIG) de 1963 à 1975, avec Jean-Jacques Levallois comme secrétaire général. Il

était alors rédacteur du Bulletin géodésique dans le cadre du Bureau central de l'AIG.

Il fut élu en 1975 secrétaire général de l'AIG, succédant ainsi à J.-J. Levallois, fonction qu'il exerça avec bonheur jusqu'en 1991.

Celles et ceux qui ont eu la chance de travailler à ses côtés ou sous ses ordres se souviennent de ses qualités exceptionnelles, qualités d'écoute et de compréhension, qualité d'expertise technique qui allait bien au-delà de la géodésie, sens des relations humaines et de la transmission. Face aux difficultés de toutes natures rencontrées nécessairement dans ses postes à hautes responsabilités, il cherchait systématiquement la discussion et, malgré sa pleine légitimité à le faire, ne recourait pas aux arguments d'autorité. Ces qualités expliquent bien la notoriété internationale qui fut la sienne, et qui permit à la France d'occuper dans ce domaine une place d'honneur parmi les nations. Enfin, nous associons à sa mémoire celle de son épouse Jacqueline, également disparue en 2018, dont l'appui et le soutien ont permis à Michel d'accomplir sereinement ses missions professionnelles. Elle a participé par son sens de l'accueil et son goût du partage des cultures à créer des relations internationales amicales et chaleureuses, lors de réunions à Paris ou lorsqu'ils étaient à leur tour reçus aux quatre coins de la planète géodésique.

Michel restera pour bon nombre d'entre nous un repère, une boussole. Nous partageons la tristesse de sa famille et remercions sa fille Catherine pour l'aide apportée dans cet hommage. ●

C. Boucher, F. Duquenne, M. Kasser



Hommage du Bureau des longitudes à Jean Kovalevsky

Jean Kovalevsky, né le 18 mai 1929 à Neuilly-sur-Seine, figure éminente de l'astronomie, de la géodésie spatiale et de la métrologie au niveau mondial, est décédé le 17 août 2018 à Grasse. Il était Membre de l'Académie des sciences, Membre honoraire du Bureau des longitudes et Astronome émérite à l'Observatoire de la Côte d'Azur.



Élève de l'école normale supérieure (1951-1955), agrégé de mathématiques (1954), il choisit de s'orienter vers la mécanique céleste grâce à André Danjon alors directeur de l'Observatoire de Paris. Il est recruté comme attaché puis chargé de recherche dans cet établissement où il se forme à l'astrométrie en travaillant sur l'astrolabe de Danjon (1955-1960). En parallèle, il effectue, en vue de son doctorat, des recherches sur le mouvement d'un satellite lointain de Jupiter, sous la direction de D. Brouwer, à l'Université de Yale (1957-1959). De retour en France, docteur ès sciences (1959), il est nommé chef du service des calculs et de mécanique céleste du Bureau des longitudes (BDL), position qu'il occupera pendant plus de dix ans (1960-1971). Il y renouvelle les méthodes de calcul utilisées pour la "Connaissance des Temps", éphémérides astronomiques dont le BDL a la responsabilité depuis sa création. Il y développe, entouré de jeunes chercheurs talentueux, des méthodes de construction de théories analytiques du mouvement des corps célestes en utilisant les nouveaux moyens de calcul sur ordinateur. Ces théories analytiques, perfectionnées au cours des années, restent sans concurrence dans cette catégorie ; la version numérique, INPOP, utilisée aujourd'hui pour le calcul des éphémérides, ainsi que pour la mission Gaia de l'Agence spatiale européenne (ESA) est l'héritière directe de cette école. S'adaptant à l'ère spatiale ouverte

en octobre 1957 par le lancement de Spoutnik-I, J. Kovalevsky applique ses méthodes au problème dynamique très complexe du mouvement des satellites artificiels. Chargé de cours à la faculté des sciences de Paris dès 1959, il fut l'un des premiers à donner des cours sur ce sujet. Il publie quelques années plus tard un ouvrage intitulé "Introduction à la mécanique céleste" qui demeure une excellente monographie de base sur le sujet. Il organise, au Bureau des longitudes, une série de séminaires hebdomadaires autour de la mécanique du Système solaire, de la géodésie spatiale, de la mécanique spatiale, ainsi que de la Relativité. Ces séminaires, suivis par un public très varié, furent un superbe creuset d'idées et de projets et permirent la formation de chercheurs et d'ingénieurs à la mécanique céleste. Plusieurs thèses dans ce domaine ont été soutenues pendant cette période sous sa direction.

Il fut alors naturellement amené à prendre des responsabilités dans le programme spatial français, notamment en exploitant des données pour obtenir des positionnements géodésiques des stations d'observation de satellites. Il fut ainsi le Principal Investigateur du premier satellite géodésique français, le satellite Diapason D1 A, qui a été lancé depuis Hammaguir (Algérie) par la France (17 février 1966) afin de faire des expériences de géodésie par effet Doppler. Il a le souci du développement d'une communauté de géodésie spatiale nationale notamment avec l'Institut

géographique national (IGN) et l'ingénieur géographe général J.-J. Levallois qui sera responsable d'une Recherche coopérative sur programme du CNRS (RCP 133 en 1967) pour opérer une jonction géodésique Europe-Afrique incluant plusieurs satellites dont les satellites français Diadème (satellites DIC et DID de 1967, munis de réflecteurs laser). Dans ce contexte, J. Kovalevsky et J.-J. Levallois eurent un rôle déterminant pour la création et l'organisation du Groupe de recherches de géodésie spatiale (GRGS). Ce groupe, fédérant les équipes françaises engagées dans ce domaine, fut fondé sur un simple accord signé lors de la séance du Bureau des longitudes du 17 février 1971 entre les présidents et les directeurs de quatre instituts, l'Observatoire de Paris, l'IGN, le CNES et le BDL. Le GRGS ainsi créé (J. Kovalevsky en fut le premier directeur exécutif de 1971 à 1978) permit à la géodésie spatiale française d'être internationalement reconnue et de se lancer dans des projets de grande envergure, campagne internationale d'observations ISAGEX de satellites artificiels fondées en particulier sur la télémétrie laser, développement également d'une station laser-Lune, construction de modèles globaux de champ de gravité, etc. Le GRGS, qui a fêté ses 40 ans en 2011, est encore très actif aujourd'hui.

À la fin des années soixante, des discussions importantes se concentrent autour de la construction d'un observatoire astrométrique combinant certaines techniques classiques de l'astronomie de position avec l'apport des nouvelles technologies de mesures de distance fondées sur le laser (laser satellite, laser-Lune) et ainsi que sur la métrologie du temps. Finalement une décision est prise d'installer cet observatoire près de Grasse sur le plateau de Calern. L'accord de J. Kovalevsky de venir animer et diriger cet observatoire fut l'élément décisif pour les décideurs de l'époque pour créer le CERGA (Centre d'études et de recherches géodynamiques et

► astronomiques). Il s'agissait au départ d'un service commun interuniversitaire réunissant les observatoires de Paris, Strasbourg, Besançon, Bordeaux, Nice. Il en sera le directeur de 1974 à 1982. Très vite il adjoint au projet initial de nouvelles équipes et d'autres instruments en accueillant l'interférométrie infrarouge et optique et les mesures à haute résolution angulaire, une marque supplémentaire de son ouverture d'esprit vis-à-vis de techniques encore en devenir.

À la même époque, octobre 1974, J. Kovalevsky initie et préside une réunion décisive à Frascati (Italie) afin de rassembler une communauté internationale autour de l'astrométrie spatiale et transformer ce qui n'était alors qu'une idée française en une mission spatiale européenne. Après plusieurs années d'évaluations techniques l'ESA sélectionne Hipparcos dans son programme scientifique en 1980. J. Kovalevsky agit sans relâche dans les comités pour surmonter le scepticisme des délégués des différents États et a largement sa part dans ce succès exceptionnel. En 1982, il quitte la direction du CERGA pour se consacrer à plein temps à Hipparcos. Il forme, puis dirige, le consortium européen FAST dédié aux traitements des données de cette mission, un défi à sa hauteur avec les moyens informatiques de l'époque. En dépit d'un lancement mal réussi au départ, la mission d'Hipparcos a été une réussite retentissante qui a ouvert une voie fondamentale pour l'astrométrie. Cela a permis d'envisager une autre mission beaucoup plus ambitieuse qui a conduit à la mission Gaia de l'ESA toujours en cours. J. Kovalevsky a suivi de près la préparation de Gaia et a été membre du groupe de travail "Relativité et Systèmes de Référence". Il a assisté, malgré sa santé déclinante, en avril 2017, au Symposium IAU-330 à Nice consacré aux premiers résultats scientifiques de la mission. Lors d'une récente interview dans un magazine scientifique, il a déclaré : "J'ai l'espoir d'une énorme récolte de données précieuses." Magnifiquement, il a pu en voir la confirmation avec la deuxième livraison des résultats de Gaia quelques mois plus tard.

Un autre domaine dans lequel J. Kovalevsky a joué un rôle de tout premier plan au niveau international est celui de l'évolution des concepts liés à la définition et la réalisation des systèmes de référence terrestres et célestes, évolution devenue nécessaire du fait de la diversification des techniques d'observation astro-géodésique (VLBI, GNSS, Laser et DORIS) développées depuis 1980 et de l'amélioration spectaculaire de leur exactitude. Sa collaboration très fructueuse avec la communauté des géodésiens s'est concrétisée notamment par la publication avec J.-J. Levallois du Vol 4 (1971) de la série "Géodésie générale" dirigée par ce dernier. Il a aussi écrit "Comments on conventional terrestrial and quasi-inertial reference systems" avec I. Mueller (1981) et assumé la co-direction, avec I. Mueller et B. Kolaczek, de l'ouvrage "Reference frames in astronomy and geophysics". Ces travaux ont eu un rôle considérable pour la préparation des résolutions adoptées par l'UAI (2000) et l'UGGI (2007) sur la définition des systèmes de référence céleste (ICRS, BCRS et GCRS) et terrestre (ITRS) et la transformation entre ces systèmes, indispensables aux recherches actuelles. Il a également présidé le comité scientifique GRGS du Bureau Central de l'IERS (International Earth Rotation Service), association entre l'Observatoire de Paris, le BDL et l'IGN.

J. Kovalevsky a été l'auteur ou co-auteur de nombreux articles et ouvrages sur la mécanique céleste, l'astrométrie, et les systèmes de référence, qui sont des références internationales. Après Hipparcos, il a écrit avec K. Seidelmann l'ouvrage "Fundamentals of Astrometry". Plus récemment, il a eu un rôle très moteur dans la réalisation de l'ouvrage du BDL sur les références de temps et d'espace. Il faut également noter la portée de son enseignement de 3^e cycle pendant plus de trente ans (1963-2000), de la mécanique céleste, la dynamique spatiale et de l'astrométrie qui a été essentielle pour la formation de plusieurs générations de chercheurs.

A partir des années 1990, il mit ses vastes connaissances scientifiques et son intérêt pour la mesure en général au service de la métrologie. Il a ainsi parti-

cipé au développement de cette dernière au niveau national comme président du Bureau national de métrologie (1995-2005) et par son soutien au laboratoire de métrologie et d'essais, le LNE. Au niveau international, il fut membre puis président du Comité international des poids et mesures (CIPM) de 1997 à 2004. À ce poste, son prestige international et ses compétences en négociation ont été très utiles pour mener à terme des discussions, souvent délicates, entre les états participants au Bureau international des poids et mesures.

Le Bureau des longitudes lui a rendu un hommage exceptionnel en octobre 2018 lors de sa première réunion de l'année universitaire 2018-2019. ●

Claude Boucher (Président du Bureau des longitudes) – François Barlier, Nicole Capitaine, François Mignard (Membres du Bureau des longitudes).

Bibliographie

de ses ouvrages de référence

J. Kovalevsky *Introduction à la mécanique céleste* Ed. Armand Colin (1963, traduit en anglais 1967 et en chinois 1984).

J.-J. Levallois ; J. Kovalevsky *Géodésie générale*, Tome 4 Ed. Eyrolles, Paris (1971).

J. Kovalevsky, I. Mueller, B. Kolaczek (eds.) *Reference Frames In Astronomy and Geophysics* Kluwer Academic Publishers (1989).

J. Kovalevsky *Astrométrie moderne* Ed. Springer Verlag (1990, traduit en anglais 1995 en russe, 2004).

J. Kovalevsky, P.K. Seidelmann *Fundamentals of Astrometry*, Ed. Cambridge University Press (2004).

J. Kovalevsky Cinq chapitres dans *Les Références de temps et d'espace Un panorama encyclopédique : histoire, présent et perspectives*, Coord C. Boucher, P. Willis, Bureau des longitudes, Hermann (2017).

Prix et distinctions

Les travaux de J. Kovalevsky ont été récompensés par de nombreux prix et distinctions, dont la médaille d'Argent du CNES (1966 et 1971), les prix Prix Damoiseau (1963) et Alexandre Joannidès (1984) de l'Académie des sciences et le Prix Georges Lemaître (2009). Il était Chevalier de la Légion d'honneur et Commandeur de l'Ordre national du mérite.

Le sondeur multifaisceaux en hydrographie : utilisations actuelles et futures

■ Arnaud ABADIE - Christophe VIALA

Couramment utilisé en hydrographie, le sondeur multifaisceaux (ou SMF) est un appareil capable d'émettre et de recevoir des signaux sonores grâce à un grand nombre de capteurs. Sa spécificité réside essentiellement dans le calcul numérique de nombreux faisceaux par formation de voies, ce qui permet d'obtenir une fauchée large tout en conservant une excellente résolution. Depuis sa création à la fin des années 1970, le sondeur multifaisceaux a été majoritairement utilisé pour la réalisation de mesures bathymétriques. Cependant, ses évolutions techniques au cours des dernières décennies permettent désormais d'obtenir simultanément un grand nombre d'informations sur la morphologie et la nature du fond, ainsi que sur la colonne d'eau, avec un unique système de coque. Nous proposons ici un tour d'horizon des applications actuelles des SMF, ainsi qu'un aperçu des perspectives d'utilisations en hydrographie.

■ MOTS-CLÉS

Hydrographie, bathymétrie, acoustique sous-marine, sondeur multifaisceaux, cartographie sous-marine

veloppement de nouveaux appareils de mesure. Le fruit de cet intense travail scientifique a notamment abouti à la mise au point du sondeur multifaisceaux (ou SMF) qui fait actuellement figure d'appareil de pointe en matière d'acoustique sous-marine active.

Cette synthèse propose, dans un premier temps, de retracer brièvement les étapes clés du développement de l'acoustique sous-marine aboutissant à la mise au point du SMF et à ses multiples applications. Nous nous intéresserons ensuite à son utilisation classique dans le cadre de mesures bathymétriques et nous décrirons ses capacités actuelles. Nous aborderons dans les deux parties suivantes les techniques d'imagerie du SMF permettant d'obtenir une image acoustique du fond et de la colonne d'eau. Enfin, nous détaillerons les applications récemment développées en matière de reconnaissance de la nature des fonds marins.

Introduction

Les besoins en termes de connaissance de la morphologie et de la nature des fonds marins sont actuellement multiples et ont évolué dans le temps depuis la création des premiers systèmes acoustiques au siècle dernier. Ainsi, au début du XX^e siècle, la demande était issue du milieu militaire dans le cadre des opérations marines des grands conflits (p. ex. la détection des navires et des sous-marins ennemis) et de la détection d'obstacles à la navigation (p. ex. hauts-fonds, icebergs) (D'Amico et Pittenger, 2009 ; Rolt, 1994). Après la Seconde Guerre mondiale, de nouveaux besoins ont émergé sur des thématiques de prospections des fonds marins pour la recherche de ressources naturelles et la sécurité de la navigation (Lurton, 2002). Plus récemment, le besoin de connaissance des fonds marins se porte sur des sujets environnementaux tels que la conservation des habitats et l'évaluation des ressources halieutiques (Anderson et al., 2008).

Du fait des propriétés physiques de l'eau de mer, les moyens d'observation

en milieu marin sont bien plus limités qu'en milieu terrestre avec pourtant une surface potentielle d'exploration beaucoup plus importante, les océans recouvrant plus de 70 % de la surface du globe. Ainsi, l'emploi de moyens optiques (comme la photographie aérienne et le lidar) pour cartographier à grande échelle reste très peu usité et permet de n'obtenir des informations que dans les cinquante premiers mètres de profondeur dans de bonnes conditions (Pastol, 2011). La meilleure solution pour obtenir des données à grande échelle spatiale en milieu marin est donc l'utilisation d'ondes acoustiques qui y bénéficient de meilleures caractéristiques de propagation que dans l'air avec notamment une vitesse plus importante sur une distance plus longue, ainsi qu'une atténuation moindre (qui augmente cependant avec la fréquence des ondes émises) (Lurton, 1998).

Cette nécessité de réaliser des mesures acoustiques à grande échelle a mené à un enchaînement de recherches dans le domaine de la propagation des ondes en milieu aquatique et dans le déve-

Du premier transducteur piézo-électrique au sondeur multifaisceaux

L'histoire moderne de l'acoustique sous-marine débute au début du XX^e durant la Première Guerre mondiale avec la mise au point par Paul Langevin d'un transducteur piézo-électrique pour la détection acoustique active de sous-marins (voir Figure 1) (Katzir, 2012). Ce système de mesure a été développé sous la direction franco-britannique du *Allied Submarine Detection Investigation Committee* ou ASDIC, terme qui sera par la suite repris pour désigner les systèmes de détection acoustique actifs (D'Amico et Pittenger, 2009). S'en suit durant l'entre-deux-guerres une période de développement intense de systèmes

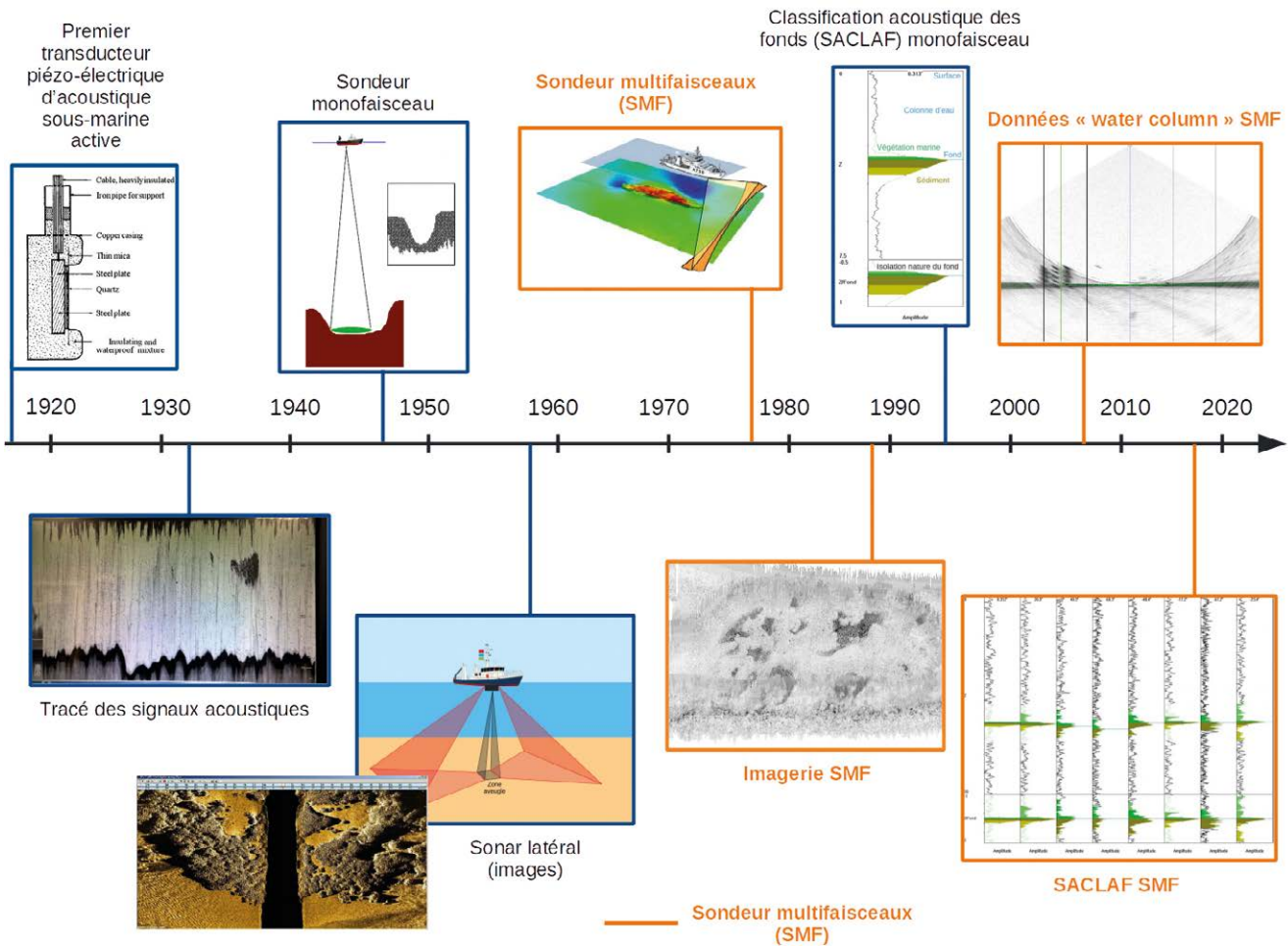


Figure 1. Historique du développement des appareils de mesure et des techniques en acoustique sous-marine



acoustiques actifs et passifs ainsi que la théorisation de la propagation des ondes acoustiques en milieu aquatique (Lurton, 1998). Ces recherches sont principalement menées par des laboratoires américains dont les systèmes acoustiques sont nommés sonars (*sounding navigation and ranging*) à partir de 1942 par analogie au terme radar (*radio detection and ranging*). L'ensemble des efforts de recherche en acoustique sous-marine durant les deux guerres a abouti à la mise au point des premiers sondeurs monofaisceau (*precision depth recorders* ou PDR) (Vilming, 1998), et au développement de sonars latéraux (Sternlicht, 2017) à la fin des années 1950 (voir Figure 1).

Les premiers sondeurs multifaisceaux (SMF) font leur apparition à la fin des années 1970 (voir Figure 1) (Vilming, 1998). La première campagne a lieu en 1975 avec un sondeur "Bo'sun" de 21 faisceaux pour une portée maximum de 800 m et une fréquence

d'émission de 36 kHz (Burke et Robson, 2015). En 1977, la portée du SMF Sea-Beam est testé jusqu'à 6 000 m de profondeur par le CNEXO (futur IFREMER) au large des côtes armoricaines (Renard et Allenou, 1979). Le fonctionnement du SMF repose sur le principe des faisceaux croisés. Généralement, l'émission de l'onde acoustique se fait dans un faisceau large transversalement et étroit longitudinalement. La réception quant à elle est réalisée, grâce à un algorithme de formation de voies, dans un lobe étroit transversalement et large longitudinalement (Blondel, 2012). L'intersection entre le faisceau d'émission et le faisceau de réception est appelée "ped de faisceau" et correspond à la zone du fond insonifiée (voir Figure 2). La mesure est ainsi réalisée sur une multitude de points répartis le long d'une ligne perpendiculaire à la trajectoire du navire. Selon les modèles de SMF, la détection du fond est réalisée sur l'amplitude ou la phase de l'onde

acoustique reçue, c'est-à-dire lorsque le signal franchit une certaine valeur pour l'amplitude, et lorsque le "déphasage" entre deux signaux reçus par deux parties voisines du transducteur de réception est nul.

L'intérêt du SMF réside dans le fait que la directivité en réception n'est pas due à la géométrie du récepteur, mais plutôt à l'utilisation de plusieurs capteurs peu directifs associés à un calcul numérique de formation de voie. Ce calcul est répété plusieurs fois pour obtenir des mesures dans toutes les directions.

Limité dans ses premières utilisations à la réalisation de mesures bathymétriques (White, 1971), le SMF a régulièrement évolué au cours des années qui ont suivi sa création, avec notamment la capacité d'obtenir des images de la réflectivité du fond à la fin des années 1980 (Clarke et al., 1996) et des images acoustiques de la colonne d'eau au début des années 2000 (voir Figure 1) (Clarke, 2006).

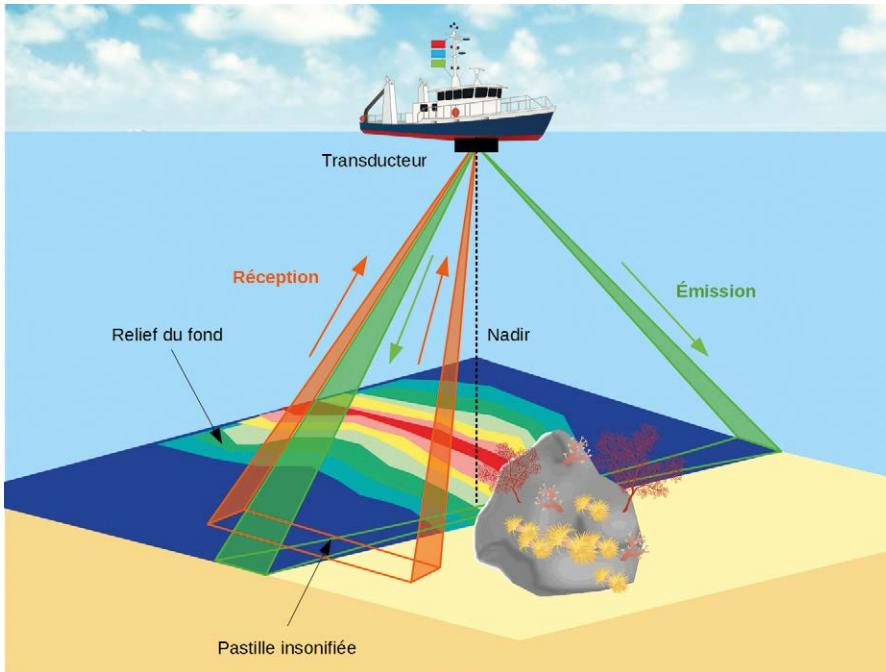


Figure 2. Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux

Utilisation classique : les mesures bathymétriques

L'utilisation première du SMF est la réalisation de mesures bathymétriques. Le principe de mesure de la profondeur par un SMF est similaire à celui d'un sondeur monofaisceau : la mesure du temps de retour d'une onde émise, réfléchi par le fond puis réceptionné. La spécificité des SMF réside dans sa multiplicité de faisceaux émis et réceptionnés simultanément qui leur permet de réaliser des mesures bathymétriques sur des surfaces plus importantes que celles couvertes par les sondeurs monofaisceau, et ainsi d'obtenir un important gain de temps sur la réalisation des levés. La portée des SMF dépend des fréquences auxquelles ils peuvent émettre (voir Tableau 1). Plus la profondeur à mesurer sera importante, plus la fréquence

d'émission devra être basse du fait de l'amortissement du son dans l'eau qui augmente avec la fréquence (Lurton, 2002). Par exemple, dans le cas d'une utilisation en eaux côtières sur des fonds ne dépassant pas 100 m de profondeur, ce seront des fréquences comprises entre 200 et 450 kHz qui seront privilégiées. Cette gamme de fréquence constitue un compromis entre une bonne résolution (haute fréquence) et une portée de mesure optimale. Pour réaliser des mesures bathymétriques sur des grands fonds de type plaines abyssales (profondeur supérieure à 3 000 m), ce seront des fréquences comprises entre 10 et 15 kHz qui seront employées (voir Tableau 1). Les variations de fréquences ne permettent pas seulement de pénétrer des masses d'eau de profondeurs différentes, elles influent également sur la résolution spatiale (qui sera meilleure

avec des fréquences élevées). De plus, la réponse acoustique de certaines cibles dépend de la fréquence d'émission du sondeur (Lurton, 1998).

Le nombre de faisceaux par fauchée des SMF varie grandement selon la gamme d'équipement et peut actuellement atteindre plusieurs centaines de faisceaux pour plus d'un millier de points de sonde (p. ex. le Reson SeaBat IDH T20). Ce nombre a notamment régulièrement augmenté depuis les premiers SMF de la fin des années 1970 qui possédaient 21 faisceaux (Burke and Robson, 1975). Selon les modèles, les faisceaux sont émis sous un angle d'ouverture compris entre 4° (par exemple le Odom Hydrographic MB1) et 0,5° (p. ex. le Kongsberg Em® 712). La répartition des faisceaux peut se faire de façon équiangulaire avec un angle θ d'ouverture constant, ou bien de façon équidistante avec une distance au fond constante entre chaque pied de faisceau. La fauchée du SMF durant les mesures bathymétriques dépendra donc non seulement de l'ouverture angulaire totale (qui peut atteindre 160° pour les R2Sonic 2022, 2024 et 2026), mais également de la profondeur. Ainsi, plus la hauteur d'eau est importante, plus la fauchée du SMF sera large. Par exemple, pour un angle d'ouverture de plus ou moins 120°, la zone insonifiée par la fauchée correspond à 3,5 fois la profondeur. Pour un angle de 150°, la fauchée sera de 7,4 fois la profondeur. La résolution des cartes bathymétriques obtenues dépendra principalement de la densité des points de sonde sur la fauchée du SMF. Ainsi, pour un nombre de sondes constant, plus la fauchée sera importante et plus la densité de points sera faible, mais la surface cartographiée sera plus importante.

Modèle	WBMS	2022	ME70	Seabat 7160	EM 124
Fabricant	Norbit	R2Sonic	Simrad	Teledyne	Kongsberg
Fréquences d'émission	200 – 700 kHz	170 – 700 kHz	70 – 120 kHz	41 – 47 kHz	10,5 – 13,5 kHz
Ouverture angulaire transversale par faisceau	0,9° x 0,9° à 400 kHz 0,5°x0,5° à 700 kHz	1° x 1° à 400 kHz 0,6° x 0,6° à 700 kHz	2° x 2°	2° x 1,5°	0,5° x 1°
Ouverture angulaire transversale totale	210°	160°	140°	-	-
Portée	275 m	400 m	700 m	3000 m	

Tableau 1. Exemples de sondeurs multifaisceaux et de leurs caractéristiques. À noter que chaque fabricant propose plusieurs gammes de sondeurs avec des portées et des caractéristiques intrinsèques différentes

La bathymétrie, comme toute mesure réalisée avec un SMF, nécessite une correction d'attitude liée aux mouvements du navire réalisant les mesures. Selon un axe orthonormé en trois dimensions avec pour référentiel le navire de mesure, trois phénomènes d'oscillation influent sur le calcul de la bathymétrie : (i) le roulis soit l'oscillation du navire autour de l'axe longitudinal X ; (ii) le tangage soit l'oscillation autour de l'axe transversal Y ; (iii) le lacet soit les rotations autour de l'axe Z. À ces trois phénomènes d'oscillation s'ajoutent trois phénomènes de translation toujours sur le même axe orthonormé : (i) le cavalement soit le mouvement de translation sur l'axe longitudinal X (dans la direction de l'avant du navire) ; (ii) l'embarquée soit la translation sur l'axe transversal Y ; (iii) le pilonnement soit les translations verticales sur l'axe Z. L'ensemble de ces variations liées au mouvement du navire sont mesurées en temps réel par une centrale d'attitude couplée au SMF afin de corriger les erreurs qu'elles induisent sur la mesure bathymétrique, ainsi qu'au système de positionnement pour corriger la dérive de l'embarcation.

En plus de corrections liées à l'attitude du navire, il est nécessaire d'apporter des corrections en fonction de la réfraction des ondes acoustiques. En effet, la trajectoire de l'onde sonore dépendra de la célérité du son dans l'eau et pourra être déviée dans le cas de profils de célérité particuliers (thermocline, arrivée d'eau douce) (Brekhovskikh et al., 2003). Chaque mesure bathymétrique s'accompagne donc obligatoirement d'un contrôle de la célérité en continu à proximité du sondeur et de la réalisation régulière de profils de célérités en fonction de la profondeur. Ces mesures permettent ainsi de corriger la réfraction et d'éviter les artefacts induits par la mauvaise correction de la célérité.

Enfin, tout levé bathymétrique, qu'il soit réalisé ou non avec un SMF, nécessite un système de positionnement permettant un géoréférencement précis. La technique généralement retenue pour obtenir la meilleure précision de positionnement implique l'utilisation d'un système GNSS (*Global Navigation Satellite System*) RTK (*Real Time*

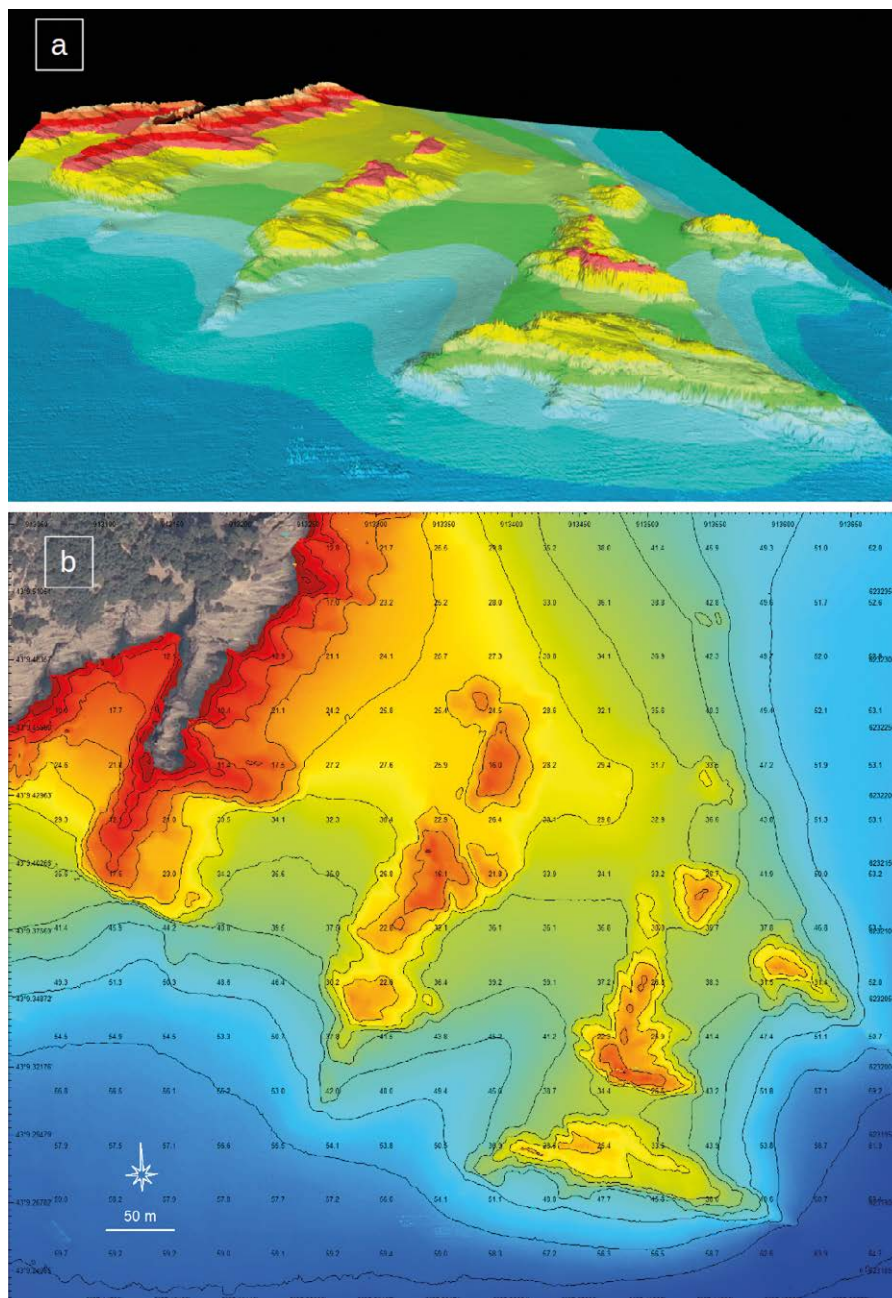


Figure 3. Rendus d'un levé au sondeur multifaisceaux R2SONIC 2022 à proximité de l'Île Verte à La Ciotat (Bouches-du-Rhône) : a) Carte bathymétrique en "fausses couleurs" avec isobathes et points de sonde ; b) Carte bathymétrique 3D de la même zone.

Kinematic) comprenant un récepteur GNSS, deux antennes et une base pour des mesures en mode différentiel. Selon la gamme du matériel et le constructeur, le récepteur peut être intégré à la centrale d'attitude (comme les sondeurs R2Sonic et les centrales Applanix) et ainsi fournir des précisions de positionnement potentiellement supérieures au RTK en intégrant les corrections d'attitude au géoréférencement classique, et en fournissant une position en continu même en cas de masquage (Stubbing et Smith, 2015). Selon les objectifs et

les limitations logistiques de l'étude, d'autres systèmes de positionnement moins précis peuvent être utilisés tels que des DGPS (*Differential GPS*) pour une précision de quelques mètres ou la méthode PPP (*Precise Point Positioning*) pour une précision de quelques décimètres (Clarke, 2018).

Une fois les données acoustiques (élimination des faux échos), de célérité et de positionnement traitées et compilées, un modèle numérique de terrain (MNT) est alors généré sous la forme d'un nuage de points de sonde géoréférencé en trois



dimensions représentant les variations d'altitude des fonds marins. Ce nuage de points peut être fourni sous la forme d'une carte en trois dimensions du fond marin (voir Figure 3a). Les rendus cartographiques peuvent aussi se présenter sous la forme de cartes en deux dimensions représentant les isobathes des profondeurs selon une densité de points de sonde préétablie ou les variations de profondeur symbolisées par des changements de couleur (voir Figure 3b).

La réalisation de mesures bathymétriques requiert donc une grande rigueur technique, que ce soit lors de la réalisation des levés ou durant le traitement des données acoustiques. Dans cette optique, l'Organisation hydrographique internationale (OHI) propose un ensemble de normes (OHI, 2011) et de documents de référence (réglementation en vigueur dans chaque pays, documents techniques) afin de définir un standard de qualité pour les levés hydrographiques à l'échelle internationale. En France, ces standards sont repris par l'Association francophone d'hydrographie (AFHY) sous la forme de recommandations pour les levés bathymétriques (AFHY, 2008).

Imagerie SMF

Utilisés classiquement pour réaliser des levés bathymétriques, les SMF possèdent cependant la capacité de fournir en parallèle d'autres types de données acoustiques. La réflectivité en fait notamment partie. Le principe de fonctionnement de l'imagerie du SMF est relativement proche de celui du sonar à balayage latéral, un faisceau acoustique étroit avec un certain angle d'incidence permettant de mesurer l'intensité de la réflectivité du fond, cette dernière variant selon sa nature (sable, roche, vase, herbiers...) (Nishimura, 1997). La génération de telles images acoustiques est rendue possible par la large ouverture des SMF (Lurton, 1998). Les premières cartes de réflectivité fournies par les SMF étaient cependant de moindre qualité comparée à celles obtenues avec les sonars latéraux du fait de la résolution longitudinale inférieure et du faible angle d'incidence des faisceaux du SMF (Le Bas et Huvenne,

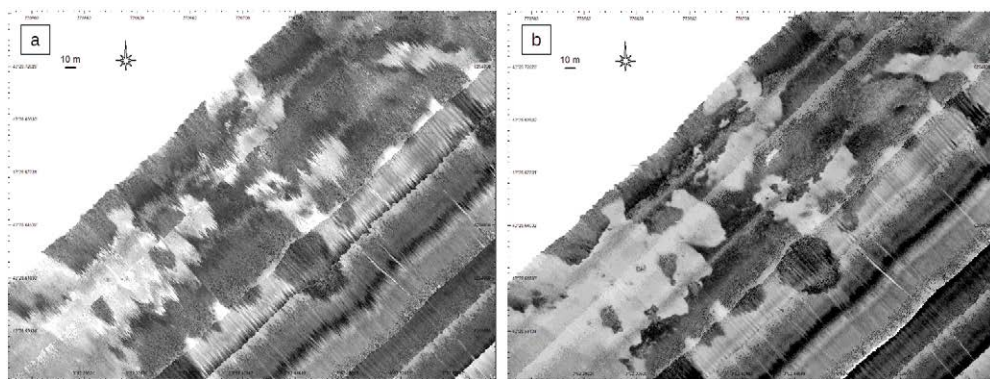


Figure 4. Amélioration des images sonar d'un sondeur multifaisceaux avec moyennage sur les "snippets" : a) avant moyennage ; b) après moyennage.

2009). Les progrès techniques des dernières décennies en matière de collecte et de traitement des données SMF combinés à l'acquisition simultanée de la bathymétrie permettent désormais d'obtenir une imagerie fournissant autant d'informations, voire plus, que celles des seuls sonars latéraux (Brown et Blondel, 2009). L'une des sources d'amélioration de la qualité de l'imagerie SMF a pour origine l'analyse poussée du signal retour des faisceaux émis selon une incidence oblique (voir Figure 4). Plus exactement, le signal acoustique émis, interagissant avec le fond avant qu'il n'atteigne son niveau de réponse maximum, se propage dans le faisceau. Il en résulte un écho allongé du fond marin dont la signature acoustique est appelée "snippet" (Lurton et al., 2015). En moyennant l'ensemble des points de mesure au voisinage de l'extrémité du faisceau, il est possible de réduire le bruit de mesure et ainsi d'obtenir une image de réflectivité plus nette.

L'imagerie est utilisée dans une optique de détection de structures naturelles dont les roches et récifs et artificielles immergées comme les épaves, récifs artificiels, mines, et de classification de la nature des fonds marins en complément des informations apportées par le relief (bathymétrie). Concernant cette dernière application, sa principale utilisation est la détermination de la nature sédimentaire du fond. Au cours des dernières décennies, de nouvelles méthodes d'analyse ont vu le jour afin d'aller plus loin dans la détection de la nature du substrat pour aboutir à des techniques de classification des habitats (par exemple roche, herbiers

sous-marins, couverts algaux) (Hasan et al., 2012). Généralement, deux types d'analyses permettent d'exploiter les images sonar fournies par les SMF : (i) l'approche géoacoustique consistant à identifier des signatures acoustiques correspondant à des types spécifiques de fonds marins d'un point de vue sédimentaire (granulométrie, porosité, densité, etc.) ou biocénotique (nature du substrat, type de peuplement). Cette recherche de signatures acoustiques est couplée à l'utilisation de données additionnelles (p. ex. des observations de terrain et des prélèvements) ; (ii) la classification orientée objet consistant à identifier sur les images des attributs particuliers sous la forme de regroupement de pixels (Brown et al., 2011). Ce dernier type d'analyse est notamment couramment utilisé sur les images de sonars latéraux.

À la haute résolution des images sonar acquises avec un SMF récent s'ajoute une précision de positionnement supérieure à celle fournie par les sonars tractés. Il est en effet évident que le positionnement des mosaïques sonar issues d'un appareil fixé à la coque d'un navire, couplé à une centrale d'attitude avec des excentres (*offsets*) d'intégration maîtrisés, est plus précis que celui d'un appareil tracté dont la position est définie en fonction de celle du navire l'employant, de sa profondeur, de la longueur de câble déroulé et de l'angle de ce dernier. Ainsi, tandis que la précision de positionnement obtenue avec sonar tracté est métrique, celle du SMF est équivalente à celle du système de positionnement du navire et peut ainsi potentiellement être centimétrique (Brissette et Clarke, 1999).



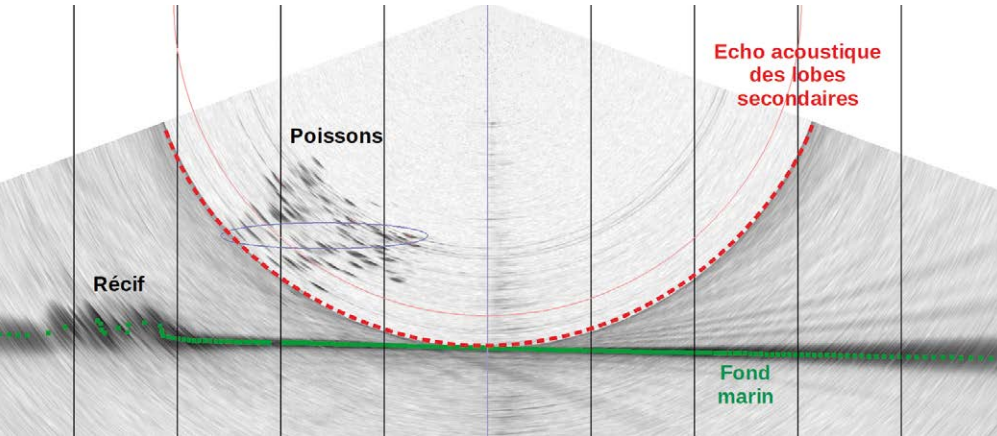


Figure 5. Exemple d'image de la colonne d'eau obtenue avec un sondeur multifaisceaux R2SONIC 2022.

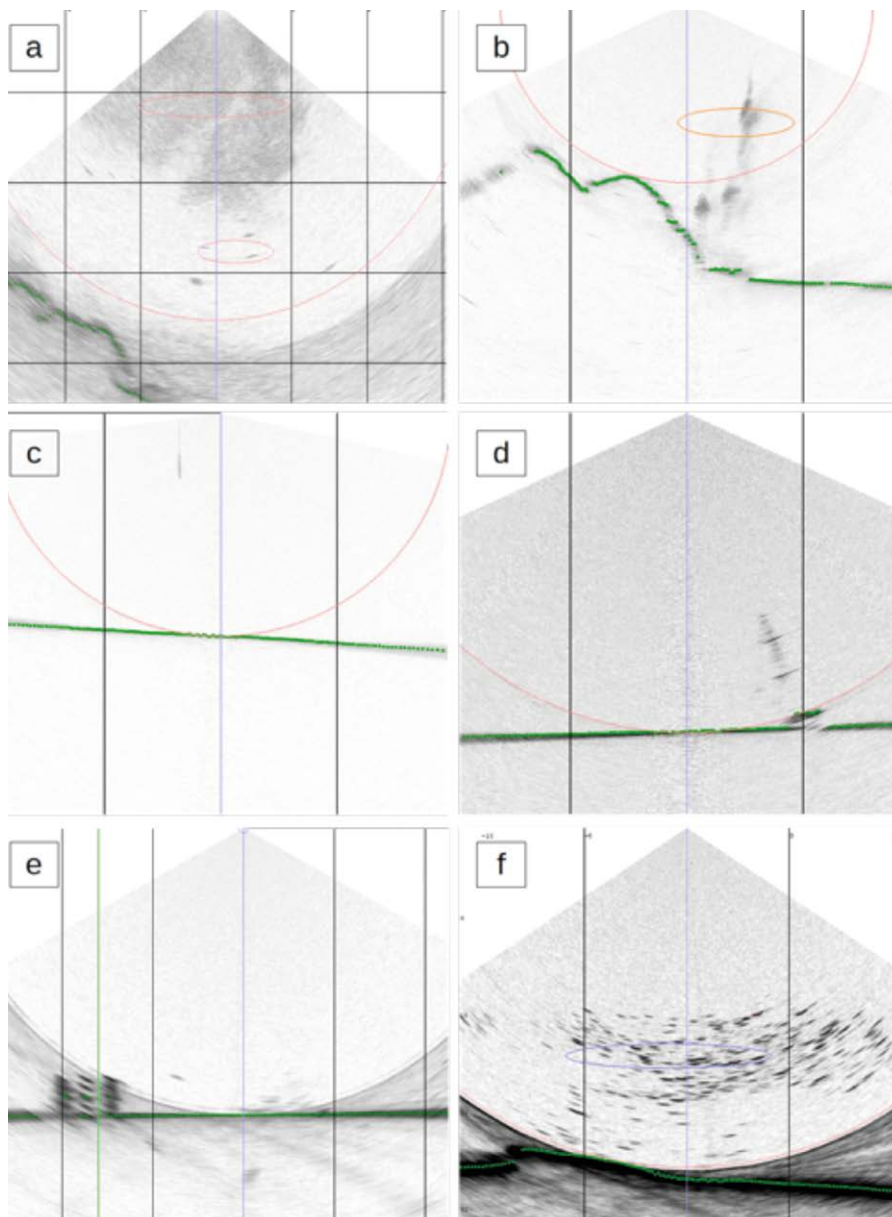
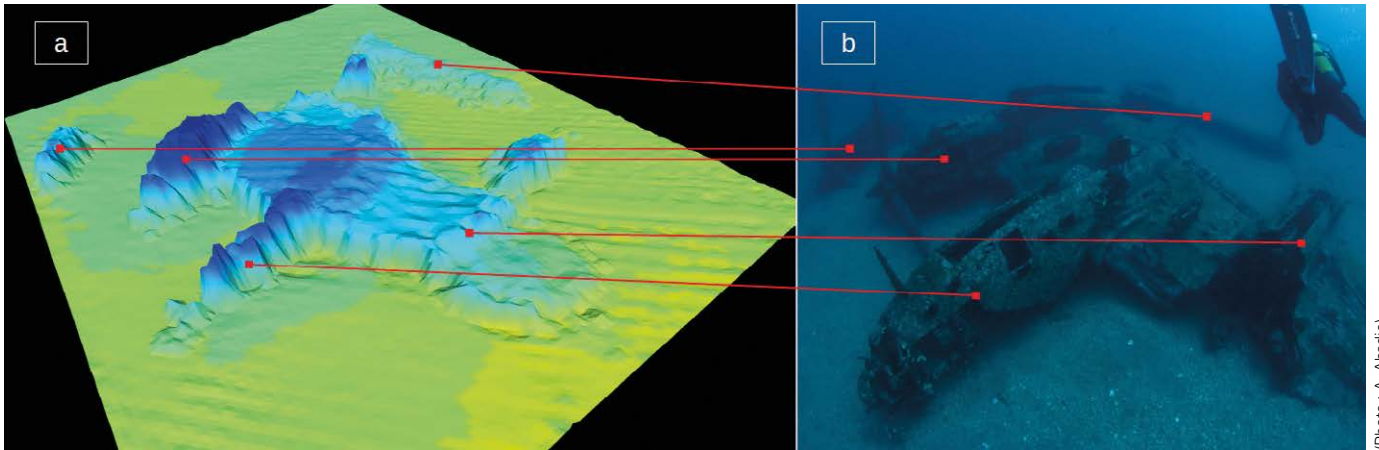


Figure 6. Exemples de cibles acoustiques identifiables sur l'imagerie de la colonne d'eau : a) sillage du navire ; b) bulles de plongeurs ; c) bout ; d) épave de voilier ; e) récif artificiel ; f) banc de poissons.

L'imagerie colonne d'eau

En complément de la bathymétrie et de l'imagerie du fond, les SMF sont également capables de fournir un troisième type de données acoustiques : une imagerie acoustique de la totalité de la colonne d'eau ou "water column imaging" (WCI) en anglais. Classiquement, les SMF se limitent à la mesure de la profondeur en filtrant grâce à des algorithmes les données acoustiques présentes au-dessus du fond marin. Le WCI consiste ainsi à récupérer ses données sur l'ensemble des faisceaux du SMF afin de produire une image acoustique de la colonne d'eau (von Deimling et Weinrebe, 2014). Le WCI prend la forme d'images de l'ensemble de la colonne d'eau (de la position du sondeur jusqu'au fond) sur laquelle figurent des échos réverbérés lors d'un cycle émission/réception (voir Figure 5). Les données sont originellement enregistrées dans un système de coordonnées polaires et sont ensuite converties dans un repère cartésien pour obtenir une représentation graphique plus aisément interprétable (ce qui explique la forme d'éventail de l'image). Les lignes courbes apparaissant sur les images sont dues à des échos issus des lobes secondaires indésirables de la fonction de directivité du transducteur (Clarke, 2006). Jusqu'à une date récente, l'important volume de données générées par cette technologie ne permettait pas de la mettre en œuvre sur des zones de grande taille. Cette difficulté, bien que toujours présente, n'est plus un obstacle du fait de l'amélioration des capacités de transfert et de stockage des fichiers informatiques. Ainsi, l'acquisition de données pour le WCI peut désormais être réalisée tant avec des bâtiments océanographiques de haute mer, qu'avec des embarcations de tailles plus modestes en eaux côtières.

Le WCI permet de reconnaître plusieurs types de cibles acoustiques dans la colonne d'eau dont voici une liste non exhaustive : (i) la traînée du bateau (voir Figure 6a) qui constitue des échos acoustiques pouvant masquer d'autres cibles ; (ii) les émanations gazeuses comme le largage de CO₂ par des fissures sous-marines ou les bulles des plongeurs (voir Figure 6b) ; (iii) les objets



(Photo : A. Abadie)

Figure 7. Exemple de cartographie fine en 3D d'une épave de chasseur P38 de la Seconde Guerre mondiale avec a) la bathymétrie 3D obtenue avec un sondeur multifaisceaux R2SONIC 2022 comparée à b) une photographie de l'épave réalisée en plongée sous-marine.

flottants entre deux eaux ou arrimés au fond tels que des bouts (voir Figure 6c) ou des débris d'arbres ; (iv) des structures artificielles reposant sur le fond tel que des épaves (voir Figure 6d) et des récifs artificiels (voir Figure 6e) ; (v) les bancs de poissons (voir Figure 6f) (Colbo et al., 2014).

Le champ d'utilisations des données obtenues à partir du WCI est vaste. Les principales applications actuelles concernent l'amélioration des cartes bathymétriques produites en récupérant des données acoustiques pertinentes éliminées par les algorithmes de traitement des SMF ou non détectées, ainsi que l'étude des ressources halieutiques. Si le nombre de thématiques d'étude est potentiellement important, l'analyse des images de la colonne d'eau reste limitée par le manque de méthodes de traitement automatisées. Cependant, la possibilité d'acquérir et de stocker ce type de données étant récente (moins de dix ans), de nouvelles techniques d'analyse telles que la *particle imagery velocimetry* (PIV) pour la détection des bulles de sources gazeuses (Von Deimling et Papenberg, 2012), ou la détection automatique de poissons (Melvin et Cochrane, 2015), devraient être pleinement opérationnelles dans les prochaines années.

Évolutions et nouvelles applications

Les évolutions majeures dans les utilisations des SMF sont indissociables de l'amélioration du matériel de mesure,

et donc de l'effort de recherche et développement réalisé par les fabricants de matériel acoustique. De même que le matériel permettant de réaliser les mesures est primordial, les développements de logiciels permettant de visualiser, traiter et analyser les données acoustiques sont un enjeu majeur pour étendre les domaines d'utilisation des SMF. La mise au point de logiciels de dépouillement et de traitement des données acoustiques brutes est réalisée par des organismes privés généralement dissociés des fabricants de sondeurs (p. ex. les logiciels QINSy et Hypack). Les logiciels d'analyse des données et la recherche de nouvelles applications sont quant à eux le plus souvent de l'initiative de structures de recherche publique (c'est le cas en France d'Ifremer, du Shom et des universités) et de projets de R&D privés.

L'un des principaux domaines d'amélioration logiciel concerne la gestion de l'important volume de données généré lors des levés au SMF. Les méthodes actuellement en cours de développement se basent sur l'utilisation de réseaux artificiels de neurones pour réduire la taille des fichiers de données et ainsi faciliter leur traitement (Wlodarczyk-Sielicka et Stateczny, 2016). Après l'acquisition et le stockage des données, un effort de recherche informatique est également réalisé au niveau de leur traitement avec notamment la mise au point d'algorithmes de détection et de qualification des sondes des SMF, permettant notamment la qualification en temps réel de la mesure

acoustique et une meilleure représentation des cibles sous-marines (épaves) (Ladroit, 2012). Enfin, les réseaux artificiels de neurones sont également employés lors de l'analyse des produits issus des données des SMF (bathymétrie, mosaïques d'images acoustiques) pour générer automatiquement des cartes de la nature des fonds (Marsh et Brown, 2009).

L'amélioration constante des performances des SMF se traduit par une augmentation régulière du nombre de sondes fournies pour une même ouverture angulaire totale. À cet accroissement du nombre de points de sonde s'ajoute une augmentation des fréquences maximales d'acquisition. L'ensemble de ces améliorations se traduit sur les cartographies par une meilleure résolution des cartes bathymétriques produites et notamment de la finesse des modèles 3D qui en découlent (voir Figure 7). L'augmentation de la résolution de mesure du relief sous-marin en trois dimensions permet ainsi un suivi plus détaillé de l'évolution de structures naturelles (mouvement d'un banc de sable, apports en sédiments et érosion d'une plage...).

La réalisation de levés bathymétriques n'est pas le seul domaine impacté par les évolutions techniques des SMF. Leur fonctionnement est également modifié avec la disponibilité de l'option dite "multispectrale" chez certains fabricants (par exemple Norbit avec le iWBMSse, R2Sonic avec le 2022) qui permet d'acquérir des données alternativement avec des paramètres différents



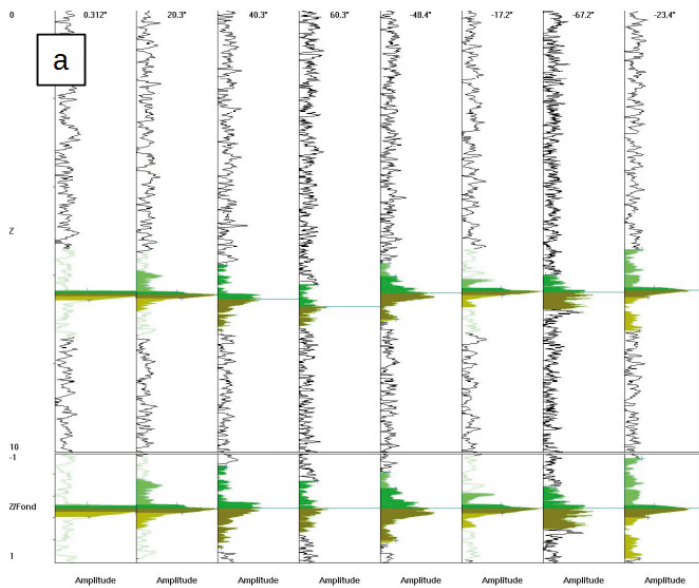
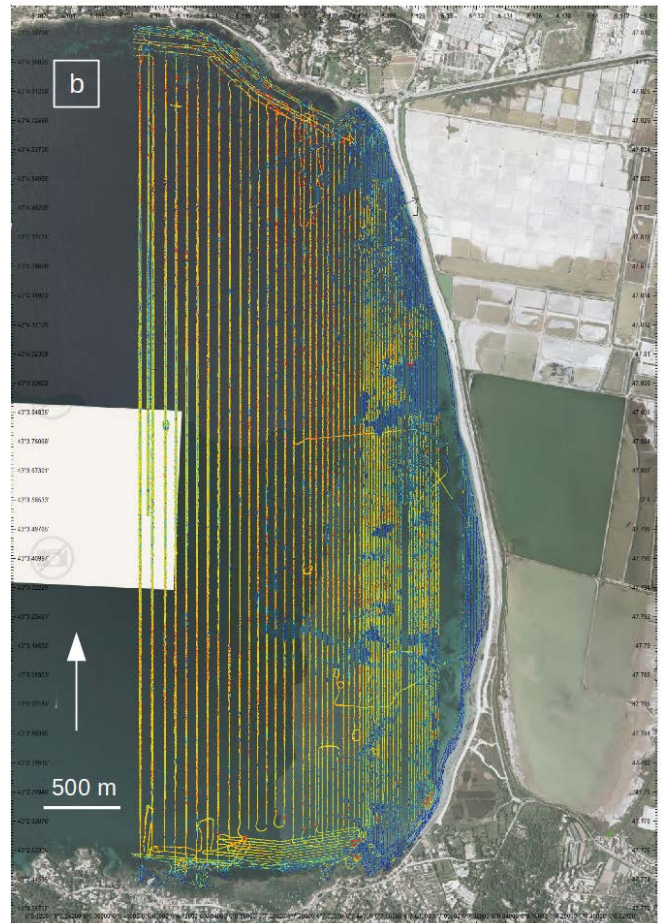


Figure 8. L'écho-intégration au sondeur multifaisceaux : a) analyse automatique du signal sur plusieurs faisceaux ; b) carte de l'écho-intégration d'un herbier sous-marin sur la partie ouest du Tombolo de Giens.



(dont fréquence et angle d'ouverture). Cette fonction, récemment disponible, est utilisée en imagerie SMF et permet notamment une meilleure discrimination des variations de nature sédimentaire des fonds marins (Feldens et al., 2018).

Les évolutions matérielles tendent également vers la production de modèles de SMF de taille plus réduite, permettant ainsi de les embarquer sur des navires de taille modeste pour réaliser des mesures hydrographiques en zone côtière et en eaux intérieures sur des zones difficiles d'accès. Ces systèmes peuvent même être employés sur des drones autonomes de surface (*unmanned survey vessel* ou USV) pour réaliser des levés acoustiques à très faible profondeur ou dans des zones difficiles d'accès pour un navire classique (Abadie et al., 2018).

La polyvalence des SMF et les récentes avancées techniques en informatique accélèrent l'émergence de techniques innovantes d'analyse des signaux et de l'imagerie acoustique. Ainsi, les systèmes acoustiques de classification des fonds (SACLAF) qui étudient la nature du fond marin, en détectant une signature acoustique sur le signal de la colonne d'eau au voisinage du substrat (Ehrhold, 2003), ne sont plus réservés aux sondeurs monofaisceau grâce aux dernières évolutions du

matériel multifaisceaux décrits dans le chapitre précédent. Depuis le début des années 2010, des SACLAF ont été adaptés à l'emploi des SMF non seulement en reproduisant la méthode classique, mais également en créant de nouvelles exploitant leur large fauchée et leur haute densité de points de sonde. L'adaptation du SACLAF monofaisceau au SMF correspond ainsi à appliquer une analyse d'écho-intégration non plus sur un unique faisceau au nadir, mais sur l'ensemble des faisceaux constituant la fauchée du SMF (*voir Figure 8*). Cependant, même avec un SMF, l'écho-intégration n'est efficace qu'au voisinage du nadir car l'augmentation de l'angle d'incidence du faisceau déforme de façon importante la réponse impulsionnelle.

Par ailleurs, la perturbation du signal reçu due aux lobes secondaires est beaucoup plus importante sous les angles de fortes incidences. En intégrant l'énergie réfléchi au voisinage de l'écho du fond, dans des intervalles pertinents par rapport à la classification recherchée, la méthode SACLAF reste

performante pour identifier la végétation sous-marine (intégration avant l'écho du fond) et détecter les variations de faciès sédimentaires (intégration après l'écho du fond) (Viala et al., 2007). Néanmoins, comme toute méthode de classification des fonds, cette technique ne s'affranchit pas de caractérisations visuelles et est employée en complément des images sonar et d'échantillonnages a posteriori (Ehrhold, 2003).

Afin de pallier au manque de couverture surfacique de l'écho-intégration pour la classification des fonds, un second SACLAF nommé BATCLAS (*Bathymetric Automated Treatment for Classification of the Seafloor*) a été récemment mis au point par Abadie et al. (2018) pour mettre automatiquement en évidence les structures naturelles et anthropiques. Cet algorithme de traitement n'utilise plus les données de la colonne d'eau, mais calcule la rugosité du fond avec une très haute résolution à partir des données bathymétriques. Cette méthode est particulièrement efficace pour détecter les herbiers sous-marins, les roches immergées (même affleu-

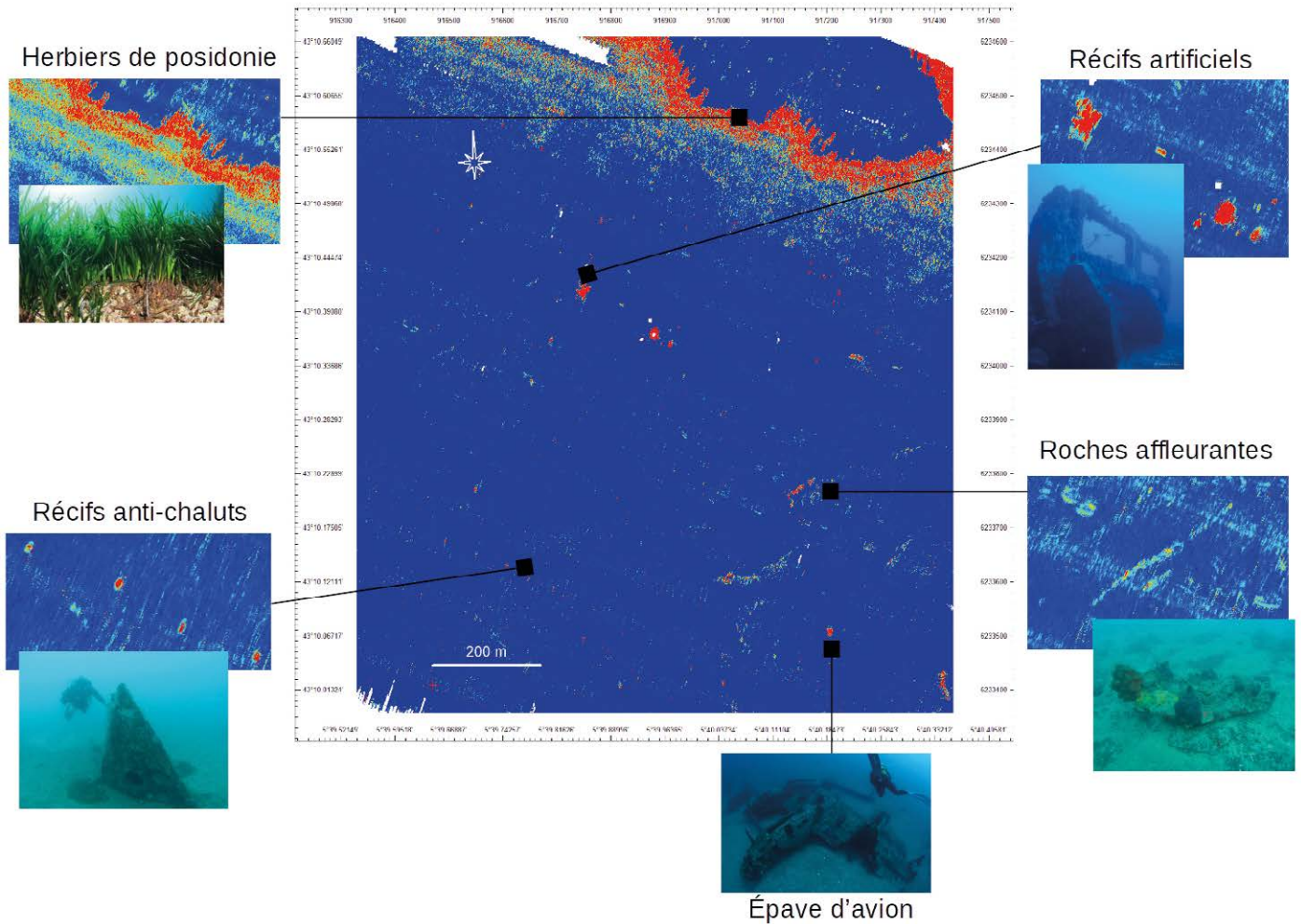


Figure 9. Exemple d'application du calcul de la rugosité (BATCLAS) pour cartographier les habitats marins et détecter les structures naturelles et artificielles.

rant à peine le sédiment), les épaves et autres structures artificielles (*voir Figure 9*). Les champs d'applications sont très vastes, allant de la cartographie fine de la structure des herbiers sous-marins à la détection de roches et d'objets artificiels de petite taille et leur positionnement précis.

En réalisant une mesure acoustique sur l'ensemble de la colonne d'eau, l'écho-intégration permet également d'obtenir des données halieutiques en trois dimensions (Gerlotto et al., 1999). Tout comme les SACLAF, ce système a été initialement développé sur des sondeurs monofaisceau pour être ensuite adapté à des SMF. Le premier sondeur multifaisceaux halieutique (ou SMFH), le ME70 de Simrad, a été testé par l'Ifremer en 2005 afin de déterminer ses capacités à détecter des bancs de poissons dans la colonne d'eau (Trenkel et al., 2008).

Ce système permet d'obtenir une vision en deux, trois ou quatre dimensions des échos acoustiques dans la colonne d'eau en réalisant l'écho-intégration sur des tranches bathymétriques. Plus récemment, un système multifaisceaux complexe (le SeapiX) combinant plusieurs transducteurs montés en croix pour obtenir en temps réel une imagerie en trois dimensions de la colonne d'eau a été développé par la société iXblue. Le principe de détection des poissons du SeapiX repose sur la détection des échos de poissons dans la colonne d'eau en mesurant l'intensité et un coefficient volumique de la réflectivité des cibles acoustiques (Mosca et al., 2016).

Conclusions et perspectives

Parmi l'ensemble des appareils acoustiques actifs actuellement disponibles pour réaliser des mesures hydrogra-

phiques, le SMF apparaît comme étant le plus polyvalent en regroupant les caractéristiques permettant de réaliser des mesures par formation de voie sur plusieurs faisceaux acoustiques avec une précision de positionnement centimétrique et une haute résolution des rendus, tout en bénéficiant d'une large fauchée de mesure et d'une forte densité de points de sonde (*voir Tableau 2*).

Les performances des SMF les rendent de plus en plus attractifs pour des organismes publics et privés même de petite taille (comme les ports et les bureaux d'études) et ne sont donc plus réservés aux organismes publics de recherche. De plus, l'augmentation de la diversité des applications, et donc de la demande, devrait mener à l'émergence de systèmes simplifiés et moins coûteux adaptés aux besoins des structures privées de petite taille, leur permettant ainsi de répondre aux attentes des



Type d'appareil	Sondeur monofaisceau	Sonar à balayage latéral	Interféromètre	Caméra acoustique	Sondeur multifaisceaux
Type de mesure	Réponse impulsionnelle	Réponse impulsionnelle	Réponse impulsionnelle. Améliorée par la connaissance de l'angle au cours du temps	Plusieurs centaines de réponses impulsionnelles calculées par formation de voie	Plusieurs centaines de réponses impulsionnelles calculées par formation de voie
Nombre d'angles de mesure (transversalement)	Un angle fixe (nadir) dû à la directivité du transducteur	Plusieurs mal déterminés - 1 ^{er} écho supposé au nadir - Puis l'hypothèse fond plat permet d'affecter un angle en fonction du retard de propagation	Par interférométrie, mal discriminé au nadir	Plusieurs centaines dues à la formation de voie	Plusieurs centaines dues à la formation de voie
Fréquences	1 à 500 kHz	100 à 900 kHz	100 à 500 kHz	1,35 à 2,25 MHz	12 à 500 kHz
Ouverture angulaire longitudinale	5 à 30°	0,5°	1°	30°	0,5°
Ouverture angulaire transversale par faisceau	5 à 30°	1°	1°	1°	0,5 à 4°
Ouverture angulaire transversale totale	5 à 30°	180°	180°	42 à 76°	150°
Portée	3 à 4 000 m	1 à 15 m (par rapport au fond)	30 cm à 200 m	30 à 100 m (autour de l'emplacement de la caméra)	1 à 12 000 m
Prix	10 000 à 50 000 €	30 000 à 80 000 €	40 000 à 100 000 €	30 000 à 130 000 €	Supérieur à 50 000 €
Applications	Bathymétrie Structures géologiques Processus sédimentaires Archéologie Classification des fonds Halieutique	Faciès sédimentaires Cartographie des habitats marins Détection de structures artificielles	Faciès sédimentaires Cartographie des habitats marins Détection de structures artificielles	Bathymétrie Inspection Suivi d'ouvrage	Bathymétrie Archéologie Classification des fonds Halieutique Faciès sédimentaires Cartographie des habitats marins Détection de structures artificielles

Tableau 2. Comparaison des caractéristiques des différents appareils de mesure en acoustique sous-marine active.



gestionnaires en charge de la sécurité de la navigation et de la gestion des ressources environnementales.

Si les SMF développés dans les années à venir sont plus compacts, moins coûteux et déployés sur des embarcations autonomes et de taille réduite, quelles seront les technologies acoustiques de mesure utilisées en hydrographie dans un futur plus lointain ? L'avenir de l'hydrographie semble se tourner vers une utilisation plus poussée de l'analyse en trois dimensions des données acoustiques (par exemple estimation des ressources halieutiques, détection d'épaves, inspection d'ouvrages immergés), et une augmentation de la résolution des données acquises pour un élargissement permanent des domaines d'applications qui ne se

limitent plus désormais aux mesures bathymétriques et à l'imagerie de la réflectivité des fonds. ●

Références

Abadie, A., Marty, P., Viala, C., 2018. *BATCLAS index: A new method to identify and map with high resolution natural and artificial underwater structures on marine wind turbine sites*, in: 3rd Wind Energy and Wildlife Seminar. pp. 120-127.
 AFHY, 2008. *Recommandations pour la conduite d'un levé bathymétrique réalisé dans le domaine portuaire, côtier ou fluvial*. AFHY.
 Anderson, J.T., Van Holliday, D., Kloser, R., Reid, D.G., Simard, Y., 2008. *Acoustic seabed classification: current practice and future directions*. ICES J. Mar. Sci. 65, 1004-1011.
 Blondel, P., 2012. *Bathymetry and its*

applications. InTech Open Access Publisher, Croatia.

Brekhovskikh, L.M., Lysanov, Y.P., Lysanov, J.P., 2003. *Fundamentals of ocean acoustics*, Third. ed. Springer Science & Business Media, New York.

Brissette, M., Clarke, J.E., 1999. *Side scan versus multibeam echo sounder object detection: Comparative analysis*. Int. Hydrogr. Rev. 76, 21-34.

Brown, C.J., Blondel, P., 2009. *Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping*. Appl. Acoust. 70, 1242-1247.

Brown, C.J., Smith, S.J., Lawton, P., Anderson, J.T., 2011. *Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques*. Estuar. Coast. Shelf Sci. 92, 502-520. <https://doi.org/10.1016/j.ECSS.2011.02.007>



- Burke, R., Robson, J., 1975. *An Evaluation of the BO'SUN Multi-Beam Sonar System*. Int. Hydrogr. Rev. 52.
- Clarke, J.E.H., 2018. *Multibeam echosounders*, in: Micallef, A., Krastel, S., Savini, A. (Eds.), *Submarine Geomorphology*. Springer, pp. 25–41.
- Clarke, J.E.H., 2006. *Applications of multibeam water column imaging for hydrographic survey*. Hydrogr. J. 120, 1–33.
- Clarke, J.E.H., Mayer, L.A., Wells, D.E., 1996. *Shallow-water imaging multibeam sonars: a new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf*. Mar. Geophys. Res. 18, 607–629.
- Colbo, K., Ross, T., Brown, C., Weber, T., 2014. *A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders*. Estuar. Coast. Shelf Sci. 145, 41–56.
- D'Amico, A., Pittenger, R., 2009. *A brief history of active sonar*. Aquat. Mamm. 35, 426–434.
- Ehrhold, A., 2003. *L'application des Systèmes Acoustiques de Classification Automatique des natures de Fonds pour la cartographie des habitats : SACLAF*.
- Feldens, P., Schulze, I., Papenmeier, S., Schönke, M., von Deimling, J.S., 2018. *Improved Interpretation of Marine Sedimentary Environments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data*. Geosciences 8, 214.
- Gerlotto, F., Soria, M., Fréon, P., 1999. *From two dimensions to three: the use of multibeam sonar for a new approach in fisheries acoustics*. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 56, 6–12.
- Hasan, R.C., Ierodionou, D., Laurenson, L., 2012. *Combining angular response classification and backscatter imagery segmentation for benthic biological habitat mapping*. Estuar. Coast. Shelf Sci. 97, 1–9.
- Katzir, S., 2012. *Who knew piezoelectricity? Rutherford and Langevin on submarine detection and the invention of sonar*. Notes Rec. R. Soc. rsnr20110049.
- Ladroit, Y., 2012. *Amélioration des méthodes de détection et de qualification des sondes pour les sondeurs multifaisceaux bathymétriques*. Télécom Bretagne, Université de Rennes 1.
- Le Bas, T.P., Huvenne, V.A.I., 2009. *Acquisition and processing of backscatter data for habitat mapping-comparison of multibeam and sidescan systems*. Appl. Acoust. 70, 1248–1257.
- Lurton, X., 2002. *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer Science & Business Media, Chichester, UK.
- Lurton, X., 1998. *Acoustique sous-marine : présentation et applications*. Editions Quae, Plouzané, France.
- Lurton, X., Lamarche, G., Brown, C., Lucieer, V.L., Rice, G., Schimel, A., Weber, T., 2015. *Backscatter measurements by seafloor mapping sonars: guidelines and recommendations*, A collective report by members of the GeoHab Backscatter Working Group.
- Marsh, I., Brown, C., 2009. *Neural network classification of multibeam backscatter and bathymetry data from Stanton Bank (Area IV)*. Appl. Acoust. 70, 1269–1276.
- Melvin, G.D., Cochrane, N.A., 2015. *Multibeam acoustic detection of fish and water column targets at high-flow sites*. Estuaries and coasts 38, 227–240.
- Mosca, F., Matte, G., Lerda, O., Naud, F., Charlot, D., Rioblanco, M., Corbières, C., 2016. *Scientific potential of a new 3D multibeam echosounder in fisheries and ecosystem research*. Fish. Res. 178, 130–141.
- Nishimura, C.E., 1997. *Fundamentals of acoustic backscatter imagery*. Naval Research Lab Washinton DC Marine Physics Branch.
- OHI, 2011. *Normes OHI pour les levés hydrographiques*. Publication S-44. Bureau Hydrographique International, Monaco.
- Pastol, Y., 2011. *Use of airborne LIDAR bathymetry for coastal hydrographic surveying: the French experience*. J. Coast. Res. 6–18.
- Renard, V., Allenou, J.-P., 1979. *Le sea-beam, sondeur à multi-faisceaux du N/O Jean Charcot description, évaluation et premiers résultats*. Rev. Hydrogr. Int. 56, 557–593.
- Rolt, K.D., 1994. *The Fessenden oscillator: History, electroacoustic model, and performance estimate*. J. Acoust. Soc. Am. 95, 2832.
- Sternlicht, D.D., 2017. *Historical development of side scan sonar*. J. Acoust. Soc. Am. 141, 4041.
- Stubbing, D., Smith, K., 2015. *Surveying from a vessel using a Multibeam Echosounder and a terrestrial laser scanner in New Zealand*, in: Australasian Coasts & Ports Conference 2015. Engineers Australia and IPENZ, p. 860.
- Trenkel, V.M., Mazauric, V., Berger, L., 2008. *The new fisheries multibeam echosounder ME70: description and expected contribution to fisheries research*. ICES J. Mar. Sci. 65, 645–655.
- Viala, C., Noel, C., Coquet, M., Zerr, B., Lelong, P., Bonnefont, J.-L., 2007. *Pertinence de la méthode DIVA pour l'interprétation des mosaïques sonar latéral*, in: Third Mediterranean Symposium on Marine Vegetation, Marseille.
- Vilming, S., 1998. *The development of the multibeam echosounder: An historical account*. J. Acoust. Soc. Am 103, 1637–1638.
- von Deimling, J.S., Papenberg, C., 2012. *Detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images*. Ocean Sci. 8, 175–181.
- von Deimling, J.S., Weinrebe, W., 2014. *Beyond bathymetry: Water column imaging with multibeam echo sounder systems*. Hydrogr. Nachrichten 31, 6–10.
- White, D.J., 1971. *BO'SUN, A Multi-Beam Sonar for Search and Survey*, in: *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Wlodarczyk-Sielicka, M., Stateczny, A., 2016. *Comparison of selected reduction methods of bathymetric data obtained by multi-beam echosounder*, in: *Geodetic Congress (Geomatics), Baltic*. IEEE, pp. 73–77.

Contacts

Arnaud ABADIE

Seaviews - ingénieur de recherche
abadie@seaviews.fr

Christophe VIALA

Seaviews - président
viala@seaviews.fr

ABSTRACT

Commonly used in hydrography, the multibeam echo sounder (or MBES) is an underwater acoustic sensor which is able to emit and receive sound signals on several beams. Its functioning rely on the emission of a sound signal reflected by the seafloor under the shape of an echo picked up by the device receiver. Since its creation at the end of the seventies, the multibeam echo sounder has classically been used to perform bathymetric surveys. However, its technical evolution over the last decades allows users to obtain simultaneously various information about the nature and the morphology of the seafloor, as well as in the water column, with a single sensor. The reader will find here a review of current multibeam echo sounder applications along with an insight of innovative techniques in hydrography.

Un algorithme pour battre le record du SwissTrainChallenge : poser le pied dans chacun des 26 cantons le plus rapidement possible en utilisant uniquement des transports publics

■ Emmanuel CLEDAT - Dirk LAUINGER

Le réseau ferré suisse est mondialement connu pour sa fiabilité et sa ponctualité. Il a aussi une troisième particularité très importante : sa connectivité. En effet, le moindre petit village de la Confédération est desservi par les transports publics. Deux doctorants ont voulu mettre ces particularités à l'épreuve, le vendredi 7 septembre 2018, à travers un défi un peu particulier.

MOTS-CLÉS

Réseau de transports, optimisation, connectivité, graphe, Chemins de fer fédéraux, SwissTrainChallenge, système d'information géographique, système d'information ferroviaire, horaire, problème relaxé

Le but est de poser le pied dans chacun des 26 cantons et demi-cantons suisses en utilisant uniquement les transports publics, et ce le plus rapidement possible. Cette idée a été proposée pour la première fois par Nicolas Rossé, journaliste de la RTS : Radio et Télévision Suisse. À l'époque, les CFF (Chemins de fer fédéraux) lui ont dit que c'était impossible^[1]. Pourtant, après de longues recherches autant géographiques que dans les horaires de trains, Philip Morf, spécialiste de la planification des trains aux CFF, a finalement trouvé un itinéraire pour relier tous les cantons pour le prix d'une carte journalière. Ce défi a beaucoup inspiré Raphael Zufferey, Chef scout de la troupe de Nyon, qui s'est dit qu'il serait possible de faire plus rapidement^[2]. Après l'inauguration du tunnel de base du Saint-Gothard, c'est au tour d'un groupe tessinois de battre le record^[3]. Chaque édition a nécessité sa dose d'esprit d'aventure, de courage et de chance, pour aller toujours plus vite (Figure 1). Pourtant, la bonne réussite de ce défi repose sur une préparation très importante : la planification des horaires pour que les correspondances se suivent au mieux, qui pour les trois premières

fois, a été établie à la main. Pour battre le temps record de la dernière édition, il devenait nécessaire de déployer l'artillerie lourde : l'emploi d'un algorithme d'optimisation couplé à un Système d'information Géographique (SIG). Cet article présente la construction de ce SIG, le principe de fonctionnement de l'algorithme d'optimisation et relate les péripéties lors du voyage.

Mise en forme des données dans le logiciel de système d'information géographique (SIG)

La première étape pour résoudre le problème du *SwissTrainChallenge* a été de télécharger les données géographiques. Celles-ci se trouvent sur le site open-data des CFF^[4]. Les premières entités chargées dans le logiciel de SIG ont été les 24 200 gares et arrêts de bus, représentés par des entités ponctuelles (Figure 2). En revanche, le canton des gares était inconnu.

Pour déterminer le canton auquel appartiennent les gares, nous avons téléchargé les frontières administratives des cantons^[5], puis effectué une

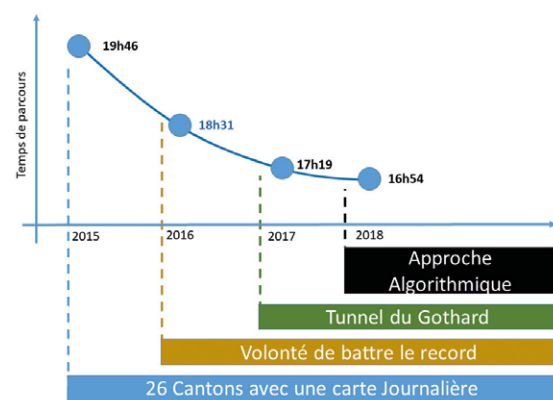


Figure 1. Records successifs du SwissTrainChallenge

jointure spatiale pour associer les gares dont les coordonnées géographiques se situaient à l'intérieur d'un canton au canton correspondant.

Les entités géographiques ponctuelles étaient alors toutes à disposition, en revanche, aucune topologie ne les liait les unes aux autres. En d'autres termes, il y avait les gares, mais pas les rails. Une solution aurait été d'importer la couche "rails" disponible sur les Swiss-Open-Geo-Datas^[6], puis d'associer les gares aux rails grâce à une jointure spatiale. Une information très importante aurait toujours manqué : l'heure de passage des trains dans les gares et si un train s'arrête dans une gare ou non. Pour pallier ce problème, nous avons téléchargé les horaires des trains, toujours sur les open-data des CFF^[4]. Ces horaires sont disponibles au format HRDF (HAFAS Raw Data Format), et au format GTFS (General Transit Feed Specification). Dans la mesure où il est plus facile d'obtenir les jours de circulation des trains avec le format de

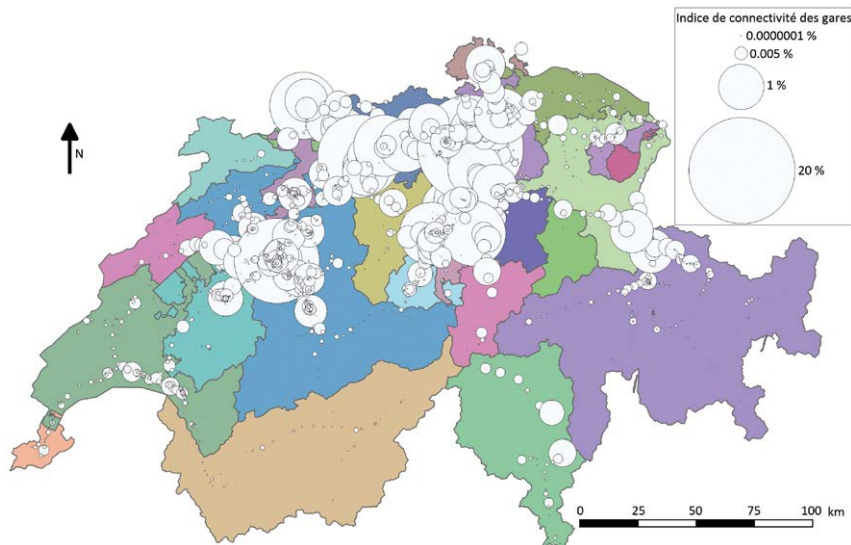


Figure 2. Affichage des gares dans un SIG (Système d'Information Géographique)

données GTFS, nous avons opté pour cette solution. Cette base de données est composée de plusieurs tables, dont la table 'Stop_Times' donnant les heures de passage des trains dans les gares, et la table 'Calendar' indiquant le jour de passage du train (Figure 3).

D'autre part, il existe des gares très proches qui peuvent être considérées comme une seule gare (comme par exemple la gare d'une ville, et l'arrêt de bus devant cette gare). Ces gares proches ont pu être agrégées grâce à une seconde jointure spatiale.

Pour réduire le nombre de gares à considérer, nous avons choisi des gares remarquables, c'est-à-dire, des gares où il nous semblait pertinent de changer de train. Pour cela, nous avons construit la matrice d'adjacence M de l'ensemble des gares de notre base de données, et calculé un indice de connectivité des gares : le Score d'Analyse Spectrale (décrit dans^[7] pour de l'analyse de réseau et utilisé dans^[8] le cadre d'analyse de réseaux topographiques). Ce score se définit en calculant le vecteur propre \vec{v} associé à la valeur propre maximale λ_{max} de M .

$$M \vec{v} = \lambda_{max} \vec{v}$$

La valeur de \vec{v} associée à la gare étudiée

est un indice de la connectivité de cette gare à l'ensemble du réseau. Le vecteur \vec{v} étant normalisé (sa norme euclidienne est unitaire), il est plus pratique de considérer le carré de ses valeurs, de manière que la somme des indices de connectivités des gares soit de 100 %. Cette valeur peut être affichée dans notre SIG. La gare ayant le meilleur score est sans surprise Zürich Hauptbahnhof, avec un score de 19.7 %. La première idée a été de sélectionner, dans chaque canton, les 5 gares les mieux connectées au sens de notre indicateur. Cependant, ni cet indicateur, ni aucun autre, plus empirique que nous avons essayé, n'a donné des résultats qui nous satisfaisaient. En effet, pour le canton de Genève par exemple, la gare de "Genève Aéroport" arrivait dans les premières, juste derrière "Genève Cornavin" (gare principale de Genève). Or, il était évident qu'il est inutile de s'enfoncer aussi loin dans le canton de Genève : tous les trains partant de "Genève Aéroport" s'arrêtent en gare de Genève avant de rejoindre d'autres cantons.

L'intelligence humaine était ici nécessaire pour choisir les gares potentielles de passage. Le SIG, représentant les gares en fonction de leur connectivité, se révélait comme un outil parfait

d'aide à la décision pour cette tâche (Figure 2). Les 81 gares retenues sont soit des nœuds ferroviaires (c'est-à-dire à l'intersection de grandes lignes), soit la première gare à l'entrée d'un canton. Le choix de ces gares étant manuel, l'oubli d'une gare importante pour effectuer une connexion était possible. Pour cela, un algorithme a été implémenté pour vérifier la présence de connexions rapides entre les gares choisies. Dans le cas contraire, cet algorithme a ajouté des points de transfert entre deux gares remarquables pour les connecter ou accélérer une connexion existante. Cet algorithme a ajouté 44 nouvelles gares d'intérêt aux 81 sélectionnées manuellement.

Une fois ces gares d'intérêt choisies, les horaires de trains ont pu être reformatsés, impliquant des simplifications. Les horaires des trains qui passent par plus de deux gares remarquables ont été séparés en morceaux distincts. Ainsi, le train faisant St-Maurice Lausanne Genève a été coupé en deux trains : St-Maurice Lausanne, puis Lausanne Genève. Les seules informations judicieuses à introduire dans l'algorithme d'optimisation présenté dans la section suivante sont la gare de départ, l'heure de départ, la gare d'arrivée, l'heure d'arrivée et la liste des cantons dans lesquels il est possible de poser le pied en prenant ce train. Cette liste de cantons peut être plus longue que simplement le canton de la gare de départ et celui de la gare d'arrivée. Par exemple, le train qui va de Biel-Bienne à Basel s'arrête dans le canton de Soleure, du Jura et de Bâle-Campagne. Il permet de poser le pied dans 5 cantons mais ne fait intervenir que deux gares remarquables. Par abus de langage, nous appellerons un trajet entre deux gares remarquables 'train' (Figure 4).

Un problème d'optimisation

La méthode classique pour trouver le trajet le plus court entre deux nœuds d'un graphe est l'algorithme A* (prononcer "A étoile")^[9]. Appliqué à notre problème, cet algorithme trouve un chemin reliant un grand nombre de cantons en peu d'itérations, mais il n'arrive pas à trouver un

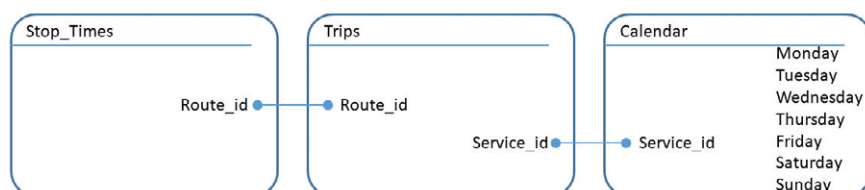


Figure 3. Organisation simplifiée des bases de données des horaires des trains au format GTFS



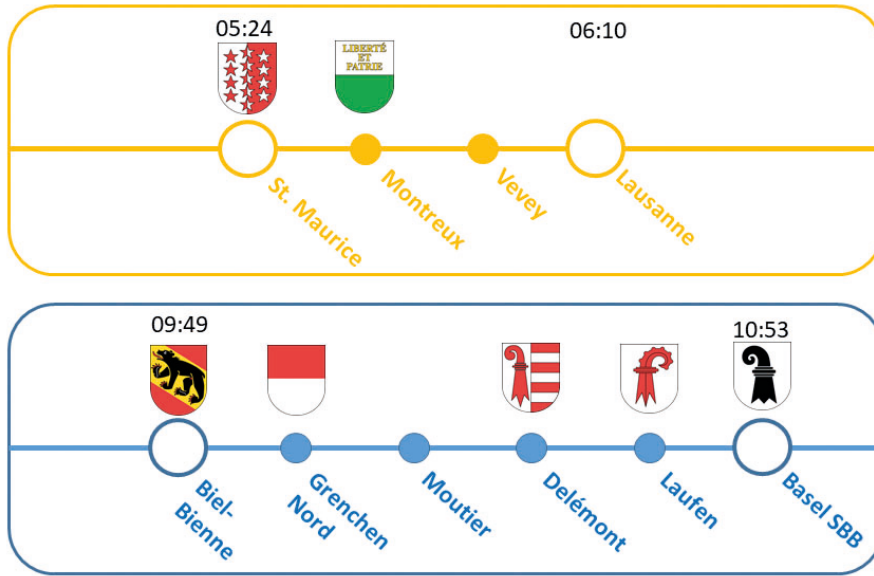


Figure 4. Extraction des “trains” : trajets de gare remarquable à gare remarquable, ayant comme attribut la liste des cantons d’arrêt.



chemin passant par tous les cantons. L’approche qui s’est relevée gagnante est celle de l’optimisation linéaire en nombres entiers^[10]. Cette méthode permet de traiter des problèmes combinatoires ayant une fonction de coût et des contraintes linéaires. Un problème d’optimisation combinatoire a déjà fait une apparition dans la revue XYZ^[11]. Nous allons ici introduire cette méthode en la comparant à la multilatération^[12] un problème connu des topographes, et présenter une application originale à notre problème d’optimisation des trains.

■ **L’exemple de la multilatération**

Soient trois bornes A, B, et C connues en coordonnées planimétriques x et y. On veut déterminer les coordonnées d’un point M en x et y. Pour cela, on

mesure les distances d_A , d_B et d_C entre M et respectivement les points A, B et C (Figure 5).

Sauf dans des cas très particuliers, les trois cercles de centre A, B et C et de rayon d_A , d_B et d_C devraient s’intersecter en un point unique : M. Cependant, due aux erreurs de mesures, ces trois cercles ne se coupent pas en un point unique. Il faut alors corriger les mesures d_A , d_B et d_C en y ajoutant les résidus v_A , v_B et v_C pour obtenir les mesures compensées \widehat{d}_a , \widehat{d}_b et \widehat{d}_c telles que les cercles de rayon \widehat{d}_a , \widehat{d}_b et \widehat{d}_c se coupent en un point unique.

Fréquemment, on répartit les résidus v_A , v_B et v_C en utilisant le critère des moindres carrés^[13, 14], c’est-à-dire que l’on va minimiser la fonction de coût $f(v_A, v_B, v_C) = v_A^2 + v_B^2 + v_C^2$.

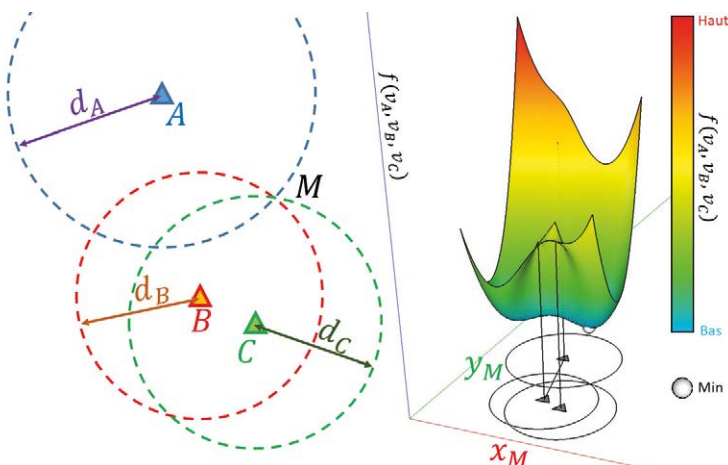


Figure 5. La multilatération (gauche) et sa fonction de coût (droite)

La meilleure position du point M au sens des moindres carrés correspond au point (x_M, y_M) et aux résidus v_A , v_B , v_C qui minimisent la fonction de coût $f(v_A, v_B, v_C)$ tel que :

$$\sqrt{(x_M - x_k)^2 + (y_M - y_k)^2} = d_k + v_k, \forall k \in \{A, B, C\}$$

c’est-à-dire au point le plus bas de la courbe représentée sur la figure 5. L’ajustement de mesures de distance lors d’une multilatération se traduit alors par la résolution de ce problème d’optimisation. L’exemple de la multilatération permet d’introduire l’optimisation de l’itinéraire de nos trains.

■ **Optimisation de l’itinéraire des trains**

Pour montrer la structure de ce problème, imaginons un pays dans lequel il n’y a que deux trains avec les heures de départ et d’arrivée décrites dans le tableau 1.

Train	t^d : heure de départ	t^a : heure d’arrivée
A	0	1
B	1	2

Tableau 1. Horaire de départ et d’arrivée.

Pour l’instant nous ne considérons ni les gares de départ, ni celles d’arrivées, ni s’il est possible de prendre le train A ou B, ni même si prendre le train A ou B a un quelconque intérêt pour la réussite de notre défi. Pourtant, il est déjà possible de poser le problème sous la forme d’un problème d’optimisation.

Dans le problème de la multilatération, les variables d’intérêt à déterminer sont les coordonnées (x_M, y_M) du point M. Dans le problème des trains, le couple de variable à déterminer est $\{\epsilon_A, \epsilon_B\}$ où $\epsilon_A = Vrai$ si on prend le train A et $\epsilon_A = Faux$ si on ne prend pas le train A (de même pour B). Sachant que notre but est d’arriver le plus tôt possible, notre fonction de coût f à minimiser est le temps d’arrivée, calculée pour toute combinaison de ϵ_A et ϵ_B dans le tableau 2. Le début de la journée est représenté par l’heure 0.

Ce problème est fondamentalement différent du problème de la multilatération. En effet, si le problème de la multilatération vise à déterminer des nombres réels (les coordonnées x et



$f(\epsilon_A, \epsilon_B)$		ϵ_A	
		Faux	Vrais
ϵ_B	Faux	0	$t_A^a = 1$
	Vrais	$t_B^a = 2$	$\max\{t_A^a, t_B^a\} = 2$

Tableau 2. Fonction de coût pour le problème des trains avec les horaires du tableau 1.

y du point M), le problème de l'itinéraire des trains utilise des variables booléennes : *Vrai* ou *Faux*.

Pour obtenir un problème qui ressemble plus au problème de la multilatération, nous effectuons une opération appelée relaxation. La valeur *Faux* sera représentée par 0, la valeur *Vrai* par 1, et au lieu de ne considérer que ces deux valeurs, nous allons considérer l'ensemble des valeurs réelles entre 0 et 1. On n'a donc plus $\epsilon_A, \epsilon_B \in \{Faux, Vrai\}$ mais $\epsilon_A, \epsilon_B \in [0,1]$ où $[0,1]$ représente l'intervalle des nombres réels entre 0 et 1. La fonction de coût exprimant l'heure d'arrivée de l'itinéraire est exprimée ci-dessous et représentée par la *figure 6*. $f(\epsilon_A, \epsilon_B) = \max\{\epsilon_A t_A^a, \epsilon_B t_B^a\}$

Pour l'instant, le minimum de la fonction de coût f est trivial. Sachant qu'il faut arriver le plus tôt possible, le mieux est de ne pas prendre de train. Il faut alors ajouter deux types de contraintes : (1) la contrainte de poser le pied dans chacun des 26 cantons, et (2) les contraintes temporelles lors des correspondances. Ces contraintes vont s'exprimer sous forme de contrainte d'inégalités. À nouveau, illustrons ce concept mathématique avec l'exemple de la multilatération.

■ L'exemple de la multilatération

Sachant que le point M se trouve à l'Est de la ligne AB, ses coordonnées doivent satisfaire l'inégalité :

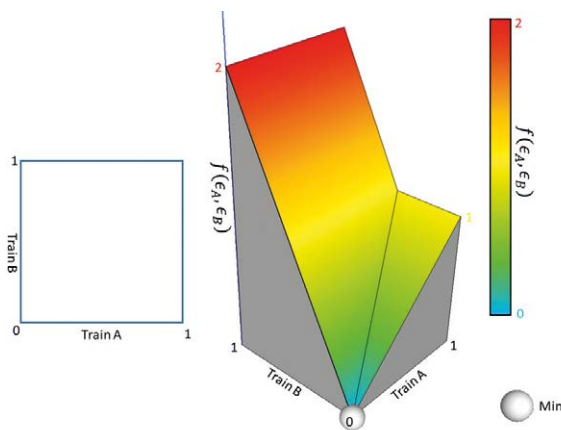


Figure 6. Fonction de coût pour le problème des deux trains

$$\chi x + \psi y + \zeta \geq 0$$

où les coefficients χ , ψ et ζ satisfont les trois conditions :

- (1) $\chi x_A + \psi y_A + \zeta = 0$
- (2) $\chi x_B + \psi y_B + \zeta = 0$
- (3) $\chi x + \psi y + \zeta \geq 0 \forall (x, y)$ à l'est de (AB).

Une fois cette contrainte appliquée à la fonction de coût $f(v_A, v_B, v_C)$ la *figure 5* devient la *figure 7*.

■ Optimisation de l'itinéraire des trains

Dans ce qui suit, nous appliquons les contraintes d'inégalité à notre problème des deux trains. Bien que les contraintes que nous souhaitons imposer à ce problème soient fondamentalement différentes de celles de la multilatération, la formulation mathématique leur ressemblera beaucoup.

Nous avons deux types de contraintes à exprimer. La première est de poser le pied dans chacun des 26 cantons. La seconde est issue des horaires de trains. Commençons avec la contrainte du nombre des cantons et considérons un pays avec deux trains. Il y a une seule gare remarquable et deux cantons (*Figure 8*). Au début de la journée, on se situe dans la gare a dans le canton α . Nous voulons poser le pied dans le canton β . Pour cela, il faut soit prendre le train A qui part de a , fait une boucle dans le canton β et revient dans la gare

a , soit prendre le train B qui fait un trajet similaire. Cette contrainte se traduit avec des opérations logiques :

$$\epsilon_A \vee \epsilon_B = Vrai$$

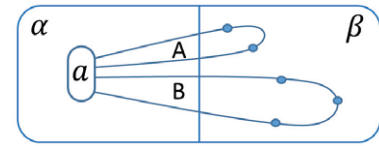


Figure 8. Carte du problème de deux trains

Pour le problème relaxé, le symbole logique \vee signifiant "ou" devient une addition.

$$\epsilon_A + \epsilon_B \geq 1$$

La *figure 9* présente l'effet de cette contrainte sur le domaine de la fonction de coût.

Le résultat de ce problème d'optimisation est évident. Il faut prendre le train A pour arriver à l'heure 1. Pour comprendre les contraintes liées aux changements de train, considérons un problème plus complexe dans lequel il y a deux gares b et c dans le canton β . Le train A va de a à b et le train B va de b à c (*Figure 10*). La première contrainte : il faut prendre au moins le train A ou le train B pour poser le pied dans le canton β , reste valide. Pour les correspondances, nous ajoutons une seconde contrainte : on ne peut pas prendre le train B si l'on n'a pas pris le train A. D'un point de vue logique, cette contrainte s'exprime par une implication.

$$\epsilon_B \Rightarrow \epsilon_A$$

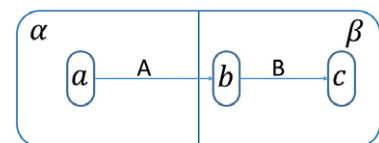


Figure 10. Carte du problème de deux trains avec une correspondance

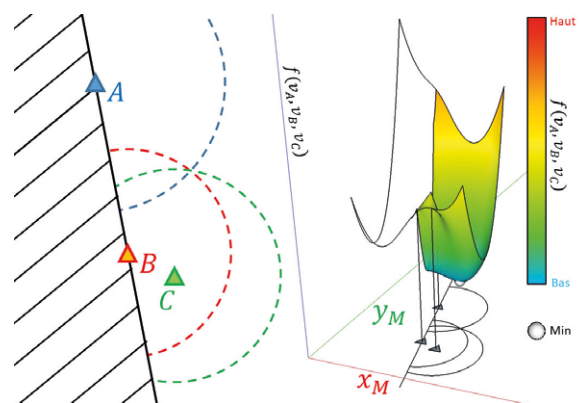


Figure 7. Fonction de coût pour la multilatération après réduction par la contrainte d'inégalité.

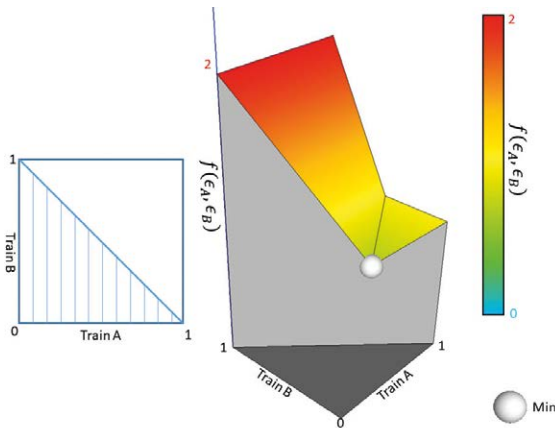


Figure 9. Contrainte d'inégalité (les hachures représentent la zone d'impossibilité) et fonction de coût f

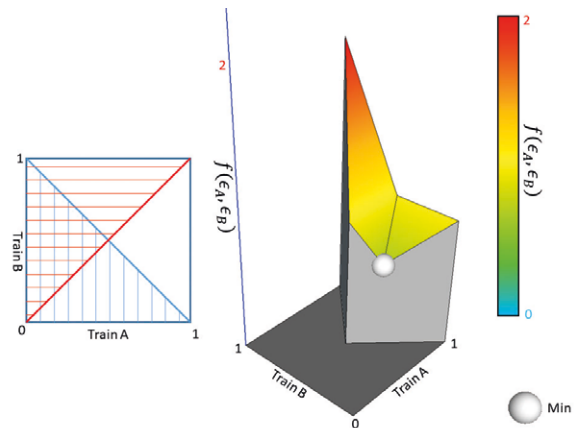


Figure 11. Deux contraintes d'inégalité (les hachures représentent la zone d'impossibilité) et fonction de coût f

Pour le problème relaxé, l'implication se traduit par une inégalité (Figure 11).

$$\epsilon_B \leq \epsilon_A$$

Bien qu'il soit évident que la solution optimale est de prendre le train A et de ne pas prendre le train B, ce problème permet d'introduire les outils mathématiques nécessaires à la résolution du problème complet.

■ Application au problème complet

La condition de visiter le canton c , s'exprime par la condition logique suivante, où Ω_c est l'ensemble des trains qui partent, passent ou arrivent dans le canton c .

$$\bigvee_{i \in \Omega_c} \epsilon_i = \text{Vrai}$$

Cette contrainte doit être validée pour tout canton c de l'ensemble des cantons. En remplaçant le "ou" logique (noté "V") par une somme et l'égalité par une inégalité, on obtient la formulation algébrique suivante.

$$\sum_{i \in \Omega_c} \epsilon_i \geq 1$$

La prise en compte des horaires est beaucoup plus compliquée. On étudie nos déplacements avant le départ du train n : il faut être arrivé dans la gare de départ de n plus de fois que l'on en est partis. On note Ω_n^a l'ensemble des trains qui arrivent à la gare de départ du train n avant que n ne parte. Similairement, Ω_n^d est l'ensemble des trains qui partent de la gare de départ du train n avant que n ne parte. Il faut encore considérer le cas particulier de la gare de départ du premier train pour laquelle le nombre de départs peut être égal au nombre d'arri-

vées plus 1. On introduit la variable ζ_n égale à 1 si le train n part de la gare de départ, 0 si non.

$$\zeta_n + \sum_{j \in \Omega_n^a} \epsilon_j - \sum_{k \in \Omega_n^d} \epsilon_k \geq \epsilon_n$$

Comme pour toutes les autres relaxations, le problème exact est obtenu quand $\epsilon_n \in \{0,1\}$. Pour des raisons de simplicité, la formulation logique a été omise.

Finalement, la relaxation du problème minimisant le temps d'arrivée du parcours fait intervenir N trains, les ensembles Ω_c , Ω_n^a et Ω_n^d étant des sous-ensembles de $\{1, \dots, N\}$.

Ceci est un problème d'optimisation linéaire. Il peut être résolu par des méthodes telles que la méthode du simplexe^[15] ou des points intérieurs^[16]. Une fois ce problème résolu pour des variables ϵ appartenant à l'intervalle $[0,1]$, il faut fixer les valeurs ϵ soit à 0, soit à 1 (il est évidemment impossible de prendre un train "à 75 %"). Cette opération s'apparente à un autre problème connu des topographes : la résolution des ambiguïtés entières dans le cadre d'un calcul d'une ligne

de base entre deux antennes GNSS. Ce dernier problème fait intervenir deux types d'inconnues à déterminer. Des nombres réels (coordonnées des points) et des entiers naturels (nombre de cycles entiers de l'onde entre le satellite et le récepteur GNSS, la phase restante étant mesurée par le récepteur^[17]). Notre problème de trains est finalement plus simple puisqu'il ne fait intervenir que des valeurs booléennes. La méthode de résolution est similaire. Après avoir résolu le problème relaxé, il faut récursivement résoudre des sous-problèmes avec les contraintes d'intégralité actives. Ceci peut se faire par exemple par un algorithme de séparation et évaluation^[18-19]. Dans le pire des cas, il faut tester toutes les 2^N combinaisons des N trains possibles. Il est donc très important de choisir un nombre limité de gares remarquables pour que N soit petit et le problème soit assez simple pour qu'on arrive à le résoudre tout en étant assez complexe pour trouver un bon trajet. Pour la résolution, nous avons utilisé le solveur Gurobi^[20] dialoguant avec le langage Matlab via l'interface/solveur yalmip^[21].

$$\begin{aligned} \min_{\epsilon \in \mathbb{R}^N} \quad & \max_{n \in \{1, \dots, N\}} \epsilon_n t_n^a \\ \text{tel que} \quad & \sum_{i \in \Omega_c} \epsilon_i \geq 1 && \forall c \in \mathcal{C} \\ & \zeta_n + \sum_{j \in \Omega_n^a} \epsilon_j - \sum_{k \in \Omega_n^d} \epsilon_k \geq \epsilon_n && \forall n \in \{1, \dots, N\} \\ & 0 \leq \epsilon_n \leq 1 && \forall n \in \{1, \dots, N\} \end{aligned}$$



Résultats : calcul de l'itinéraire et vérification sur le terrain

L'algorithme implémenté a été exécuté sur un ordinateur de bureau avec un processeur : i7-6700 CPU, 3.4GHz, 64GB RAM. Après 10 jours de calcul d'optimisation, l'itinéraire proposé permettait un temps de parcours de 16 h 54 (Tableau 3). A noter qu'on n'a pas de garantie sur l'optimalité de cette solution qui a été trouvée pour une gare de départ fixe. C'est-à-dire qu'en changeant la gare de départ ou en laissant l'algorithme tourner plus longtemps, il peut être possible de trouver un itinéraire encore plus rapide.

Les règles traditionnelles d'écriture d'une publication scientifique exigent la présentation de la validation expérimentale des méthodes proposées. Notre expérimentation scientifique s'apparente davantage à une aventure digne de Phileas Fogg et de Jean Passepartout^[22].

Départ à 5h24 de Saint-Maurice, en Valais. 6h48 changement à Genève. 8h32, Neuchâtel, les difficultés ont commencé. 9 min de retard annoncé sur le trajet Neuchâtel-Berne. Un tel retard pouvait toujours être rattrapé, et ne posait pas de problèmes majeurs puisque le temps de correspondance à Berne était assez large. Malheureusement, ce retard s'est empiré, ce qui a causé un retard de 20 min à l'arrivée à Berne. Sachant que le record ne serait pas pour cette fois, nous avons alors choisi de continuer notre itinéraire, avec une heure de retard. Le but n'était plus de battre le record, mais de prouver que – en l'absence de problèmes de correspondances – notre méthode permet de battre ce record. Pour assurer la réussite de notre défi, nous avons choisi de séparer les tâches : Dirk Lauinger dans le rôle de Phileas Fogg pour poser le pied dans chacun des 26 cantons, et Emmanuel Cledat dans le rôle de Jean Passepartout pour assurer l'intendance de l'aventure. Ce choix a été renforcé par les problèmes rencontrés pour atteindre le canton de Thurgovie. L'option proposée par notre algorithme était d'aller poser le pied à Stein-am-Rhein, petite enclave du canton de Schaffhouse entre l'Alle-

Gare de départ	départ	Gare arrivée	arrivée		
St-Maurice				VS	
St-Maurice	5:24	Lausanne	6:10	VD	
		Genève	6:48	GE	
Genève	7:15	Neuchâtel	8:24	NE	
Neuchâtel	8:32	Kerzers	8:48	FR	
		Bern	9:07	BE	
Bern	9:13	Biel/Bienne	9:38		
Biel/Bienne	9:49	Grenchen Nord	9:59	SO	
		Delémont	10:18	JU	
		Laufen	10:34	BL	
		Basel	10:53	BS	
Basel	11:17	Olten	11:48	SO	
		Zofingen	11:56	AR	
		Luzern	12:30	LU	
Luzern	12:42	Alpnachstad	12:59	OW	
Alpnachstad	12:59	Hergiswil	13:03	NW	
		Luzern	13:17		
Luzern	13:18	Arth-Goldau	13:46	SZ	
Arth-Goldau	13:50	Bellinzona	14:47	TI	
Bellinzona	15:07	S. Vittore, Zona industrielle	15:18	GR	
S. Vittore, Zona industrielle	15:31	Bellinzona	15:50		
Bellinzona	16:13	Flüelen	16:48	UR	
		Arth-Goldau	17:09		
Arth-Goldau	17:13	Zug	17:27	ZG	
		Zürich HB	17:51	ZH	
Zürich HB	18:05	Schaffhausen	18:43	SH	
13 Schlatt bei Diessenhofen, Thurgau				En Publibike	TG
Schaffhausen	19:16	Zürich HB	19:55		
Zürich HB	20:12	Ziegelbrücke	20:58	SG	
Traverser la rivière qui fait la frontière par le pont				GL	
Ziegelbrücke	21:02	Uznach	21:14		
Uznach	21:16	Herisau	21:46	AR	
Herisau	21:58	Jakobsbad	22:18	AI	

Tableau 3. Horaire proposé par notre algorithme, réajusté manuellement.

magne et la Thurgovie. Cependant, des erreurs dans l'utilisation des données ont conduit à des horaires de départ erronés pour le train entre Winterthur et Stein am Rhein, ce qui a conduit à devoir modifier manuellement l'itinéraire. La solution choisie a alors été d'emprunter des PubliBikes : vélos en libre-service à la gare de Zürich, les emmener à Schaffhouse avec nous

dans le train, pédaler pendant 3.7 km pour rejoindre le canton de Thurgovie, puis faire le trajet inverse avant de poursuivre le trajet calculé par notre algorithme. Malheureusement, des actes de vandalisme sur les PubliBikes Zürichoïses ont rendu cette option inexploitable. La solution retenue a alors été de nous séparer à Bellinzona. Pendant que Dirk allait rejoindre le canton des





Grisons avec le car postal, Emmanuel partait à Schaffhouse pour louer des vélos proposés par les CFF. La suite de l'histoire est commune : retrouvailles à Schaffhouse, Thurgovie à vélo et retour à Schaffhouse pour finir l'aventure sur les rails.

Lors de ce voyage, deux types de données ont été acquises. Des données GNSS, avec un récepteur dans le sac à dos porté par chacun des aventuriers, et des photos de chaque canton (Figure 2). Cet événement a été médiatisé par 13 reportages ou articles de journaux qui relatent plus en détails les aspects pratiques et culturels du voyage [23, 25].

Conclusion

Cette aventure est la preuve qu'une approche algorithmique permet de trouver l'itinéraire permettant de battre le record du *SwissTrainChallenge* qui consiste à poser le pied dans chacun des 26 cantons de la confédération helvétique le plus rapidement possible, le tout, en n'empruntant que des transports publics.

La particularité de notre méthode est le couplage de l'intuition humaine (dans la sélection des gares remarquables) à la puissance de calcul d'un ordinateur (pour la résolution du problème d'optimisation).

Nous avons aussi montré la qualité du réseau ferré suisse. En effet, excepté le train Neuchâtel-Berne, l'ensemble des trains a montré une ponctualité exemplaire ! Les points difficiles du parcours ont été réussis avec plus de facilité que prévu. Notre arrivée à 23 h 18 à Jakobsbad nous a prouvé que battre le record du *SwissTrainChallenge* en 16h54 est possible. Personnellement, nous serions très heureux de voir une autre équipe battre le record du *SwissTrainChallenge* en utilisant notre tableau d'horaire ou notre algorithme. ●

Contacts

Emmanuel CLEDAT

Doctorant au laboratoire de Topométrie de l'EPFL - emmanuel.cledat@epfl.ch

Dirk LAUINGER

Doctorant à l'EPFL à la Chaire d'analyse de risque et d'optimisation et au Centre d'Énergie - dirk.lauinger@epfl.ch

Remerciements

Nous souhaiterions remercier l'ensemble des journalistes qui ont médiatisé l'événement du *SwissTrainChallenge*. En particulier, Anne-Muriel Brouet, Laura Cipriano et Alain Herzog, travaillant pour l'EPFL, ainsi que Nicolas Rossé et François Isoard pour leur reportage pour la RTS (Radio et Télévision Suisse).

Bibliographie

- Rossé, N. *Les 26 cantons en un jour de train, c'est possible !* RTS (2015) <https://www.rts.ch/play/tv/19h30/video/nicolas-rosse-teste-le-reseau-ferroviaire-de-la-suisse-en-faisant-un-tour-des-26-cantons-en-20h?id=7008456&station=a9e7621504c6959e35c3ecbe7f6bed0446cdf8da>
- Swiss Train Challenge : 26 cantons en 18 h 31. <https://www.facebook.com/swisstrainchallenge/>
- Record-breaking friends visit all 26 Swiss cantons in 17 hours. *The Local* (2017).
- Plate-forme Open Data des transports publics suisses. <https://opentransportdata.swiss/fr/>
- Ruedin, D. *A Modified Shapefile for Plotting Swiss Cantons*. (2015). <https://druedin.com/2015/11/21/a-modified-shapefile-for-plotting-swiss-cantons/>
- Réseau ferré <https://opendata.swiss/fr/dataset/schienennetz>
- Gleyze, J.-F. *Réseaux, territoires et accessibilité*. (Institut Géographique National, 2001).
- Hullo, J.-F. *Fine registration of kilo-station networks - a modern procedure for terrestrial laser scanning data sets*. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* (2016).
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. & Raphael, B. *A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths*. *IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern.* 4, 100-107 (1968).
- Nemhauser, G. L. & Wolsey, L. A. *Integer and combinatorial optimization*. (Wiley, 1983).
- Jospin, L. & Ortolo, M. *Essaim de drones pour la cartographie de grandes zones, comment optimiser le plan de vol*. *XYZ* n°149 pp 25-31 (2016)
- Egels, Y. & Laroze, E. *La topo au disto, bon marché, tient dans la poche*. *XYZ* n°149 pp 49-52 (2016).
- Legendre, A.-M. *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*. (1805).
- Gauß, C. F. *Theoria Motus Corporum Coelestium in sectionibus conicis solem ambientium*. (1809).
- Murty, K. G. *Linear programming*. (Wiley, 1983).
- Karmakar, N. *A new polynomial-time algorithm for linear programming*. in *Sixteenth annual ACM symposium on the theory of computing* (1984).
- Teunissen, P. J. G. & Verhagen, S. *GNSS Ambiguity Resolution: When and How to Fix or not to Fix?* in *IV Hotine-Marussi Symposium on Theoretical and Computational Geodesy* (eds. Xu, P., Liu, J. & Dermanis, A.) 143-148 (2008)
- Land, A. H. & Doig, A. G. *An automatic method of solving discrete programming problems*. *Econometrica* 497-520 (1960).
- Little, J. D., Murty, K. G., Sweeney, D. W. & Karel, C. *An algorithm for the traveling salesman problem*. *Operations Research* 972 (1963).
- Gurobi Optimization <http://www.gurobi.com/>
- Lofberg, J. *YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB*. in *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 284-289 (2004).
- Verne, J. *Le tour du monde en quatre-vingts jours*. (J. Hetzel, 1873).
- Students use algorithm in bid to visit all 26 Swiss cantons in less than 24 hours...by train*. *The Local* (2018).
- Late train derails bid to set new time record for visiting all 26 Swiss cantons by public transport*. *The Local* (2018).
- Faire le tour des 26 cantons en un jour, c'est le défi des transports publics suisses*. RTS <https://www.rts.ch/play/tv/19h30/video/faire-le-tour-des-26-cantons-en-un-jour-cest-le-defi-destransports-publics-suisses?id=9827914>

ABSTRACT

The Swiss Train Challenge is to set foot in all 26 cantons of Switzerland in as little time as possible, using only public transportation. Relying on human intuition informed by a geographical information system to select the relevant train stations, and on computational power to solve the resulting mixed-integer linear optimization problem, we find a solution that beats the current record of 17 hours and 19 minutes, by 25 minutes. When testing our itinerary in practice, we made all connections but one for which the arriving train was 20 minutes delayed - a rare event in Switzerland. This is the first time that an algorithm has been used to calculate the Swiss Train Challenge itinerary.

Génération d'observations pour la validation ou la comparaison de logiciels d'ajustement de mesures par moindres carrés

■ Stéphane DURAND

Dans un précédent article, paru en 2012 (cf. [9]) dans la revue XYZ n°132, nous avons réalisé une validation du logiciel CoMeT par comparaison à d'autres logiciels d'ajustement de mesures topographiques faisant usage de la méthode des moindres carrés. Pour réaliser ces comparaisons, nous avons simulé différents jeux d'observations dans des réseaux de tailles variables, et comparé les résultats obtenus en termes de coordonnées ajustées et d'estimateur du facteur unitaire de variance. Dans le présent article, nous allons rappeler et discuter quelques méthodes classiques de génération d'observations et surtout, présenter plus en détails la méthode que nous avons exploitée à l'époque, qui possède quelques propriétés particulières.

■ MOTS-CLÉS

Moindres carrés, génération d'observations, comparaison/ validation de logiciels

sentant le facteur unitaire de variance et Q la matrice de covariance, aussi appelée matrice des cofacteurs, sur les observations (i.e. les précisions a priori sur les mesures et les covariances entre les mesures).

Cette hypothèse de comportement normal des erreurs accidentelles confère des propriétés statistiques intéressantes à la solution des moindres carrés, permettant de construire différents tests d'hypothèse pour vérifier le bon déroulement du traitement, mais également de déterminer des régions de fiabilité et de confiance. De nombreux ouvrages traitent de ces notions, et le lecteur intéressé pourra se reporter par exemple à [6] ou [14].

Pour juger de la qualité d'un traitement par moindres carrés, deux quantités sont particulièrement utilisées. Si \hat{X} désigne la solution des moindres carrés, le vecteur des résidus de mesures correspond à une estimation des valeurs des erreurs accidentelles sur les mesures, et se définit par :

$$\hat{V} = B - A(\hat{X} - X_0) \quad (\text{éq. 3})$$

Le second indicateur de la qualité d'un traitement par moindres carrés est l'estimateur du facteur unitaire de variance, défini par :

$$\hat{s}_0^2 = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{n - m}$$

Comme indiqué par exemple dans [6], il est courant de réaliser, à l'issue d'un traitement par moindres carrés, un test global de validation du traitement comme première étape dans un processus de recherche de fautes ou d'erreurs de pondération éventuelles

Introduction

Dans les sciences de la mesure, et plus particulièrement dans les sciences associées au métier du topographe, la méthode d'ajustement la plus largement employée est la méthode des moindres carrés.

De manière synthétique, il s'agit de déterminer un ensemble de m paramètres inconnus, à partir d'un ensemble de n observations surabondantes. Formellement, on peut regrouper les m inconnues du problème dans un vecteur X et les n observations dans un vecteur L :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix}, m < n$$

Dans la méthode classique des moindres carrés, chaque mesure l_i est liée au vecteur X des inconnues par la relation :

$$l_i = f_i(X) + e_i$$

Expression dans laquelle $f_i(X)$ représente le modèle fonctionnel, liant

mesure et inconnues, aussi appelé l'équation d'observation, et e_i représente la valeur de l'erreur associée à la mesure, inhérente au processus de mesure utilisé. En regroupant l'ensemble des erreurs de mesures dans un vecteur E , on obtient la relation matricielle suivante :

$$L = f(X) + E \quad (\text{éq. 1})$$

Étant donnée une valeur approchée X_0 des paramètres, l'équation 1 est linéarisée au premier ordre sous la forme :

$$B = A(X - X_0) + E \quad (\text{éq. 2})$$

Expression dans laquelle B correspond à la différence entre les observations L et leurs valeurs approchées $f(X_0)$, calculées à partir des valeurs approchées de X et du modèle fonctionnel utilisé, et A correspond à la jacobienne en X_0 de la fonction f .

Le modèle stochastique classiquement utilisé consiste à considérer que le vecteur E des erreurs sur les mesures est uniquement constitué d'erreurs accidentelles et suit une loi normale centrée, de matrice de covariance $s_0^2 Q$, s_0^2 repré-



dans les mesures. Ce test est basé sur la quantité :

$$s = (n - m) \frac{s_0^2}{s^2} \quad (\text{éq 3b})$$

En faisant l'hypothèse que le vecteur des erreurs accidentelles de mesure suit une loi normale centrée de covariance $s_0^2 Q$, désignée par $N(0, s_0^2 Q)$, la statistique suit une loi du chi-deux à $n-m$ degrés de libertés. Dans le cas d'un test bilatéral, on fixe un seuil de confiance p , en général compris entre 80 et 99 %, et on détermine, à partir de la loi du chi-deux à $n-m$ degrés de liberté, la région d'acceptation $[\gamma_1, \gamma_2]$ du test. On vérifie alors que la quantité s appartient à l'intervalle $[\gamma_1, \gamma_2]$. Si cela est le cas, le test du chi-deux est validé au seuil p , autrement dit le vecteur des résidus semble globalement bien suivre la loi $N(0, s_0^2 Q)$. Si cela n'est pas le cas, le test du chi-deux échoue, autrement dit il existe des éléments du vecteur des résidus pour lesquels des fautes sont présentes ou une mauvaise pondération a été utilisée.

Un second test statistique couramment employé pour affiner la détection de fautes ou d'erreurs de pondération sur les mesures dans le cas d'erreurs normalement distribuées est celui dit de Baarda (cf. [2] ou [6]). Ce test fait l'hypothèse que le facteur unitaire de variance s_0^2 est connu et est basé sur la notion de résidu normé w_i défini par :

$$\forall i = 1, \dots, n, w_i = \frac{\hat{v}_i}{s_0 \sqrt{q_{v_i v_i}}} \quad (\text{éq. 3c})$$

Dans cette expression, \hat{v}_i désigne l'élément i du vecteur des résidus \hat{V} et $q_{v_i v_i}$ l'élément (i,i) de la matrice des cofacteurs $Q_{\hat{V}}$ sur les résidus :

$$Q_{\hat{V}} = Q - A (A^T Q^{-1} A)^{-1} A^T$$

Pour des erreurs accidentelles suivant une loi $N(0, s_0^2 Q)$, chaque résidu normé est censé suivre la loi normale centrée réduite $N(0, 1)$. Pour un seuil de confiance p donné, il est possible de calculer un intervalle $[-\gamma, \gamma]$ tel que l'on considérera qu'aucune faute et aucun problème de pondération n'affecte la mesure i si la valeur du résidu normé associé w_i se trouve dans cet intervalle. Par exemple, pour un seuil de confiance de 95 %, la valeur de rejet est $\gamma = 1.96$.

Vérifier / comparer / tester des logiciels de traitements par moindres carrés

Dès lors que l'on cherche à évaluer un logiciel de traitement d'observations faisant usage de la méthode des moindres carrés, ou à comparer plusieurs logiciels entre eux, la première idée qui vient naturellement à l'esprit est d'utiliser un ou plusieurs jeux d'observations acquises spécifiquement pour ces tests, ou issues de campagnes anciennes. Après traitement de ces observations, on étudiera en particulier les valeurs ajustées des paramètres, mais également les valeurs des résidus et de l'estimateur du facteur unitaire de variance.

Utiliser des observations acquises sur le terrain a l'avantage d'assurer que les tests réalisés le sont avec des observations reflétant bien la réalité du terrain. Néanmoins, il n'est pas toujours possible de maîtriser entièrement les mesures réalisées sur le terrain, surtout sur des données anciennes : erreurs de mise en œuvre non documentées ou manque d'information sur les conditions de mesures, manque de précision sur les mesures de hauteur de voyant ou d'appareil, correction de réfraction pas assez fine... etc. De plus, il n'est pas toujours possible de réaliser sur le terrain l'acquisition du jeu de mesures idéal pour tester un logiciel : matériel non disponible, impossibilité pratique de mesure, manque de temps.

Pour tester ou comparer des logiciels d'ajustement par moindres carrés, il est possible de recourir à la génération de jeux d'observations. Un exemple relativement connu dans le monde de la topographie est celui du logiciel Bernese, de l'Institut Astronomique de l'Université de Bern (cf. [8]) qui propose un module GPSSIM assez complet pour la génération d'observations GNSS. En reprenant l'équation (1), il suffit pour cela de définir le modèle fonctionnel f à utiliser, de fixer les valeurs des paramètres X ainsi que les valeurs associées aux erreurs sur les mesures E . On peut alors calculer un ou plusieurs jeux de valeurs pour les observations L . Certes, les mesures ainsi obtenues ne rempla-

ceront pas des valeurs réelles acquises sur le terrain. Mais la génération d'observations permet de disposer de jeux de mesures pour des campagnes d'observations difficiles à réaliser en pratique. Elle autorise également la construction de jeux de données où l'on peut faire varier un paramètre en particulier, et uniquement ce paramètre.

Génération d'observations

Dans le cas de l'article proposé en 2012 (cf. [9]), l'objectif était par exemple de comparer, à des fins de validation, le logiciel CoMeT (cf. [10]) avec d'autres logiciels d'ajustement de mesures tachéométriques. Un des points étudiés était la manière dont les différents logiciels tiennent compte de la sphéricité de la Terre et son influence sur les résultats obtenus (coordonnées, résidus).

Pour réaliser cette étude, nous avons généré des observations sur différents réseaux de points possédant une géométrie commune, constituée de deux points connus en coordonnées 3D, notés S1 et S2, et d'un point inconnu P1, répartis sur les 3 sommets d'un triangle équilatéral de barycentre G. La Figure 1 illustre la forme des réseaux et précise les types d'observations considérés dans chaque réseau. Différents jeux de mesures avaient été générés, en faisant varier la longueur du côté du triangle, d , de 25 m à 50 km.

Afin d'illustrer la présente contribution, nous allons reprendre cette idée d'un réseau de trois points formant un triangle équilatéral. Nous allons considérer comme barycentre les coordonnées RGF93 de la station permanente MAN2. Partant d'une taille d de réseau, nous pouvons alors définir les coordonnées théoriques des points du réseau, dans le repère local associé au barycentre G par rapport à l'ellipsoïde IAG-GRS80. Les coordonnées planes locales des points se déduisent de la forme du triangle et nous avons fixé les coordonnées verticales locales des points comme suit : 10 m pour S1, -10 m pour S2 et 0 m pour P1. Ce faisant, nous pouvons disposer de valeurs théoriques pour l'ensemble des paramètres X_{th}^d d'un réseau de taille d , en particulier les coordonnées cartésiennes

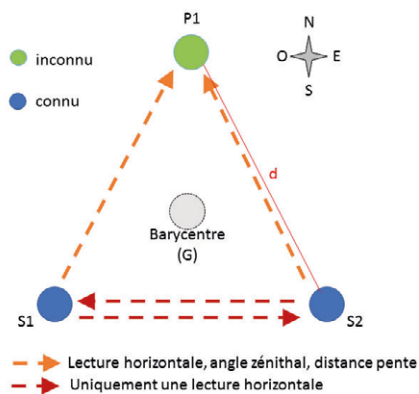


Figure 1. Forme générale des réseaux utilisés pour générer les jeux de mesures. Tous les réseaux ont en commun le barycentre G.

géocentriques RGF93 des points. Il est alors possible de calculer les valeurs théoriques des observations $f(X_{th}^d)$, en utilisant le modèle fonctionnel 3D Géodésique de CoMeT, en négligeant la réfraction sur les angles zénithaux, et en considérant une déviation de la verticale nulle en chaque point du réseau par rapport à l'ellipsoïde IAG-GRS80.

Afin de générer un jeu d'observations pour notre réseau de taille d , il nous reste, en suivant l'équation (1), à construire un vecteur d'erreurs sur les mesures E .

Mesures générées sans erreur

Une première manière de construire le vecteur E est de le prendre nul. Dans ce cas, si on ajuste nos observations avec un logiciel utilisant le même modèle fonctionnel que celui ayant permis la génération des mesures, les paramètres ajustés correspondent exactement, au critère de convergence choisi près, aux valeurs théoriques de ces mêmes paramètres utilisés pour générer les observations. De plus, le vecteur des résidus, qui est une valeur estimée du vecteur des erreurs sur les mesures, correspond exactement à la valeur de E utilisée pour générer les mesures et est donc nul. Par conséquent, la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance est également nulle.

Regardons de plus près les conséquences sur les tests statistiques classiquement utilisés à l'issue d'un

traitement par moindres carrés pour la recherche de fautes. Au niveau du test sur les résidus normés, la valeur du résidu étant nulle, le résidu normé est également nul et sa valeur est exactement au milieu de l'intervalle $[-\gamma, \gamma]$. Le test sur le résidu normé est donc toujours validé, quel que soit le seuil de confiance utilisé.

Concernant le test du chi-deux, les résidus étant tous nuls, l'estimateur du facteur unitaire de variance vaut zéro, et la quantité s de l'équation 3b sera obligatoirement nulle. Si on regarde la forme de la densité de probabilité de la loi du chi-deux, on remarque que, quel que soit le degré de liberté utilisé, les valeurs de la densité de probabilité sont supérieures ou égales à zéro. Ainsi, pour un seuil de confiance inférieur à 100 %, la valeur nulle de la quantité s sera toujours en dehors de la région d'acceptation $[\gamma_1, \gamma_2]$ et notre test de validation globale échouera. Comme les mesures générées ne sont pas affectées d'erreurs (ni du coup de fautes), c'est donc un problème de pondération sur les mesures. En effet, puisque nous n'avons pas ajouté d'erreurs à nos mesures, nous devrions considérer une précision nulle sur nos observations... Ce qui n'est pas réaliste.

Ainsi, ne pas ajouter d'erreurs à nos mesures générées n'est pas optimal lorsque le même modèle fonctionnel est utilisé pour générer et ajuster les mesures.

Si on réalise un ajustement avec un logiciel utilisant un modèle fonctionnel différent, les résidus sur les observations seront représentatifs des différences entre les modèles fonctionnels. De même, les coordonnées ajustées obtenues seront différentes des coordonnées théoriques.

A titre d'illustration, nous avons généré avec le logiciel CoMeT, en utilisant son modèle fonctionnel 3D Géodésique, des observations sans erreur pour des réseaux de taille variant de 50 m à 5 km. Nous avons ajusté ces mesures d'une part en utilisant le même modèle fonctionnel et d'autre part en utilisant le modèle 3D Locale de CoMeT. Dans ce dernier, l'ajustement des mesures se fait dans le repère local associé au barycentre commun des réseaux, le point G, par rapport à l'ellipsoïde IAG-GRS80, en considérant une déviation de verticale nulle en G, et sans aucune prise en compte de la sphéricité de la Terre. Comme le montrent les résultats de l'article de 2012, nous devons donc nous attendre à des différences sur les résultats entre les deux calculs qui augmentent avec la taille du réseau, et surtout au niveau des écarts sur les coordonnées verticales des points.

La figure 2 montre les écarts en coordonnées planes et verticales par rapport aux coordonnées théoriques des points, obtenus lors de l'ajustement des jeux d'observations sans erreurs en utilisant les deux modèles

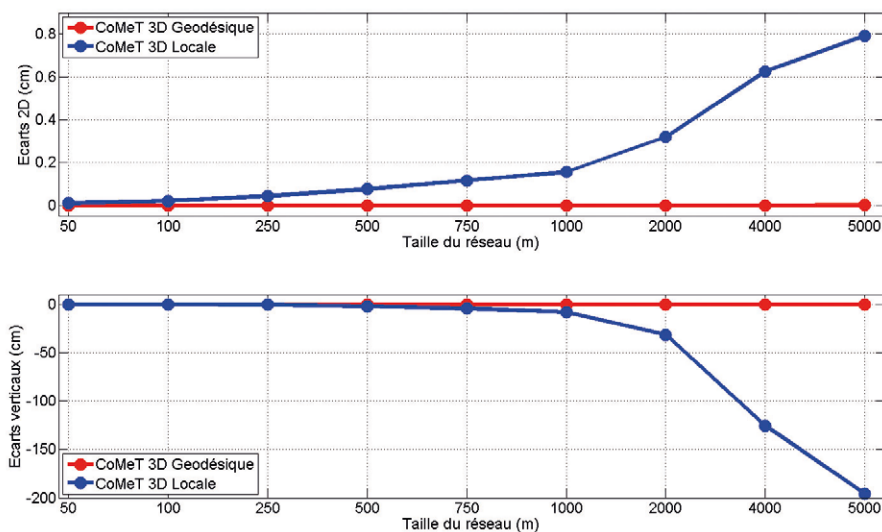


Figure 2. Écarts entre les coordonnées ajustées et les coordonnées théoriques en planimétrie et en vertical, en cm, pour différentes tailles de réseaux.

► fonctionnels. On constate comme attendu qu'en utilisant le même modèle fonctionnel pour l'ajustement et la génération des mesures, les coordonnées ajustées sont identiques aux coordonnées théoriques. Lorsque l'on utilise pour l'ajustement des mesures le modèle fonctionnel en 3D Locale de CoMeT, les écarts aux coordonnées théoriques augmentent avec la taille du réseau, résultat cohérent avec les différences de modèles fonctionnels : on obtient un écart sur les coordonnées verticales nul pour des réseaux de taille inférieure à 100 m, de 2 cm pour un réseau à 250 m et de presque 2 mètres à 5 km.

Mesures générées avec un vecteur d'erreur suivant la loi normale

Certes, utiliser un vecteur d'erreurs nul correspond à la manière la plus simple de générer des observations. Cela conduit malheureusement à un échec systématique du test du chi-deux. Une seconde méthode consisterait donc à générer de manière aléatoire un vecteur E suivant la loi normale centrée en tenant compte des précisions a priori sur les observations.

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour générer des nombres aléatoires suivant la loi normale centrée réduite, comme par exemple la méthode de Box-Muller (cf. [3]), qui réalise cette génération à partir de nombres aléatoires suivant une loi uniforme, sachant que tous les langages de programmation actuels proposent au minimum une fonctionnalité de génération de nombres aléatoires suivant la loi uniforme dans l'intervalle $]0,1[$. Il est ensuite possible de passer de la loi normale centrée réduite à n'importe quelle loi normale centrée d'écart-type donné.

Plutôt que de générer un seul vecteur d'erreurs et d'étudier les résultats de l'ajustement des mesures associées, il est courant de générer un lot de k vecteurs d'erreurs, et d'étudier statistiquement les résultats du traitement les k jeux de mesures associés, la valeur de k étant choisie de manière que les résultats aient une réelle signification

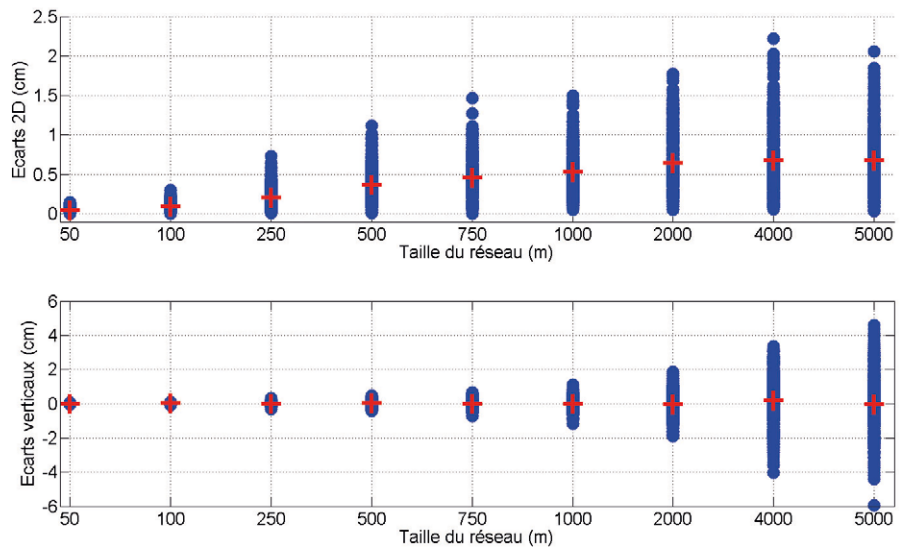


Figure 3. En bleu, les écarts entre coordonnées théoriques et coordonnées ajustées en planimétrie (en haut) et en vertical (en bas). En rouge, les écarts moyens sur les 100 jeux ajustés pour chaque taille de réseau.

statistique. On parle alors d'analyse par la méthode de la propagation des distributions (ou simulation Monte Carlo).

Afin d'illustrer nos propos, nous allons considérer une précision a priori sur les mesures angulaires de 0.3 mgon et sur les mesures de distances de 5 mm et générer, pour chaque taille de réseau, 500 jeux d'observations avec des vecteurs d'erreurs constitués de valeurs aléatoires issues de la loi normale centrée. Ce faisant, nous considérons donc connu le facteur unitaire de variance avec une valeur $s_0^2 = 1$.

La figure 3 représente les écarts en coordonnées planes et verticales, en centimètres, entre les coordonnées ajustées en utilisant le même modèle fonctionnel que celui utilisé pour la génération des mesures et les coordonnées théoriques du point P1, en fonction de la taille du réseau. Pour chaque taille de réseau, on précise également en rouge la valeur moyenne sur l'ensemble des 500 jeux générés.

Sur les écarts en coordonnées planes, on constate une évolution de l'étendue des valeurs qui augmente fortement avec la taille du réseau. L'étendue est d'environ 1.4 mm pour le réseau de taille 50 m puis de 14 mm pour celui de taille 750 m pour atteindre 20 mm pour le réseau de 5 km. On constate

également que la valeur moyenne de l'écart planimétrique augmente avec la taille du réseau pour atteindre 0.6 cm pour le réseau de taille 5 km. Sur les écarts en coordonnées verticales, on constate également une augmentation de l'étendue des valeurs en fonction de la taille du réseau, plus prononcée encore que sur les coordonnées planes (1 mm à 50 m, 13 mm à 750 m et 110 mm à 5 km). On remarque également que la valeur moyenne sur les 500 jeux de mesures générées par réseau augmente avec la taille du réseau (nulle à 50 m, autour de 0.5 mm à 5 km).

La figure 4 (en haut) représente les valeurs obtenues pour l'estimateur du facteur unitaire de variance sur chaque jeu de mesures générés. En rouge apparaît la valeur moyenne de l'estimateur du facteur unitaire de variance sur les 500 jeux générés, naturellement proche de l'unité. Sur cette figure sont également représentées en vert les bornes de la région d'acceptation du test du chi-deux, en considérant un degré de liberté de 3 et un seuil de confiance de 87 %. Sur cette figure, on constate une étendue des valeurs de l'estimateur du facteur de variance importante, allant de 5 pour le réseau de taille 50 m à 6.3 pour le réseau de 5 km. On constate que pour un certain nombre de jeux de mesures, entre 5 et 10 %, le test du chi-deux n'est pas validé au seuil de 87 %.

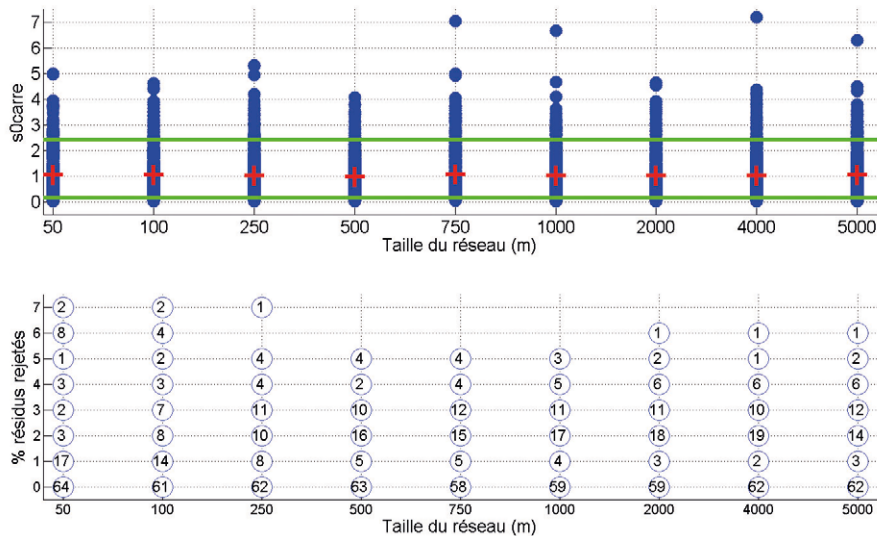


Figure 4. En haut, valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance en bleu et bornes de la région d'acceptation du test du chi-deux en vert (seuil de 87 %). En bas, nombre de jeux de données possédant un certain nombre de résidus rejetés (test de Baarda) au seuil de 87 %.

Avec ce même seuil de confiance, la *figure 4* (en bas) représente pour chaque taille de réseau, le nombre de résidus ne validant pas le test de Baarda. On constate que pour environ 60 % des jeux de mesures générées, quelle que soit la taille du réseau, tous les résidus valident le test de Baarda. Il reste donc toujours environ 40 % des jeux de mesures où au moins un et au maximum 6 résidus sur les 8 possibles ne valident pas le test.

Ainsi, en générant des erreurs de manière aléatoire en suivant la loi normale centrée, et en tenant compte des précisions a priori sur les observations, il peut arriver que les erreurs générées influent fortement sur la solution ajustée. Le problème apparaît surtout lors de la génération aléatoire d'un vecteur d'erreurs de taille peu importante ($n < 50$), comme cela est le cas dans nos réseaux exemples. En effet, même si les valeurs d'erreurs générées aléatoirement proviennent d'une loi normale centrée, la taille du vecteur fait que lorsqu'une valeur générée possède une valeur absolue un peu forte, elle n'est pas compensée par la présence en nombre important d'autres valeurs d'erreurs plus faibles, et a donc une forte influence sur la solution des moindres carrés. Cela peut conduire à un échec du test du chi-deux et au rejet de certains résidus normés.

Mesures générées avec contraintes particulières

Dans l'article de 2012, notre objectif principal était de comparer, à des fins d'inter-validation, les résultats de différents logiciels sur des jeux de données générés issus de réseaux de taille variable, de 25 m à 50 km. Afin de faciliter l'analyse des résultats, tant en termes d'écart aux coordonnées théoriques que de valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance, nous avons généré plusieurs jeux de mesures par taille de réseau, suivant la loi normale centrée, en tenant compte des précisions a priori sur les mesures et en utilisant le modèle fonctionnel 3D Géodésique de CoMeT. Pour chaque taille de réseau, nous avons ensuite sélectionné un seul jeu de mesures, pour lequel, lors de l'ajustement par le logiciel CoMeT avec le même modèle fonctionnel, la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance était proche de 1, et les écarts entre coordonnées théoriques et ajustées étaient très faibles. Ce choix de jeux de mesures particuliers nous permettait de juger rapidement des différences entre les résultats obtenus par les différents logiciels. Ainsi, un logiciel possédant un modèle fonctionnel proche de celui utilisé par CoMeT pour générer les mesures devait produire des écarts faibles entre coordonnées ajustées et théoriques, et une valeur

de l'estimateur du facteur unitaire de variance proche de 1.

Entre 2014 et 2015, nous avons repris cette idée et développé de manière plus précise une méthodologie de génération d'erreurs telle que, lorsque les mesures générées sont ajustées avec le même modèle fonctionnel que celui utilisé pour les générer, elles répondent aux critères suivants :

(a) la solution ajustée correspond exactement aux paramètres théoriques utilisés pour générer les mesures
 (b) quel que soit le seuil de confiance choisi, le test du chi-deux est validé
 (c) étant donné un seuil de confiance p , tous les résidus normés valident le test de Baarda.

Pour répondre à la condition (a), rappelons que lors de la génération des observations, comme indiqué dans l'équation 1, on part de valeurs théoriques X_{th} , pour les paramètres et on forme un vecteur d'observations L par :

$$L = f(X_{th}) + E$$

Lors de l'ajustement des mesures, on utilise l'équation linéarisée (équation 2) et on procède par itération sur la valeur approchée des paramètres. Considérons pour simplifier que la valeur approchée X_0 pour les paramètres corresponde aux paramètres théoriques X_{th} utilisés pour générer les observations. L'équation 2 devient alors :

$$\hat{X} - X_{th} = (A^T Q^{-1} A)^{-1} A^T Q^{-1} E$$

Si l'on souhaite que les paramètres ajustés correspondent à leurs valeurs théoriques, il faut choisir le vecteur E non nul tel que :

$$(A^T Q^{-1} A)^{-1} A^T Q^{-1} E = 0 \quad (\text{éq. 4})$$

En effet, nous avons déjà discuté auparavant du cas E nul, qui n'était pas optimal pour notre besoin. En pratique, l'équation 4 exprime le fait que le vecteur E appartient au noyau, noté $ker(K_1)$, de l'application linéaire :

$$K_1 = (A^T Q^{-1} A)^{-1} A^T Q^{-1}$$

La matrice Q étant par construction symétrique définie positive, on peut trouver, par décomposition de Cholesky, une matrice R telle que $Q^{-1} = R^T R$. Posons alors K l'application linéaire définie par :

$$K = (A^T Q^{-1} A)^{-1} A^T R^T$$





Si le vecteur E appartient au noyau de K_1 alors le vecteur $y = RE$ appartient au noyau de K . Comme la matrice K est de taille $n \times m$ et de rang m par construction, la dimension du noyau de K est $n - m$. En considérant β une base orthogonale du noyau de K , pour tout vecteur y de dimension $n - m$, la quantité βy appartient au noyau de K . Nous pouvons donc construire facilement un vecteur d'erreurs E répondant à l'équation 4 en choisissant un vecteur réel y de taille $n-m$ et en formant :

$$E = R^{-1}\beta y \quad (\text{éq. 5})$$

Pour répondre à la condition (b), rappelons que le test du chi-deux est basé sur la quantité s de l'équation 3b qui suit une loi du chi-deux à $n-m$ degrés de liberté si le vecteur des erreurs de mesures suit la loi $N(0, s_0^2 Q)$. En considérant la condition (a) réalisée, i.e.

$\hat{X} = X_{th}$, le vecteur des résidus obtenu correspond, d'après l'équation 3, au vecteur :

$$\hat{V} = E \quad (\text{éq. 6})$$

La valeur centrale pour la loi du chi-deux étant son degré de liberté, on peut assurer que le test du chi-deux sera validé quel que soit le seuil de confiance choisi dès lors que l'on peut trouver E tel que :

$$E^T Q^{-1} E = (n - m) s_0^2$$

La condition (a) étant supposée satisfaite, on peut utiliser l'équation 5 pour exprimer la condition (b) sous la forme :

$$y^T y = (n - m) s_0^2 \quad (\text{éq. 7})$$

Pour répondre à la condition (c), il faut fixer un seuil de probabilité p , et en déduire les bornes de la région d'acceptation du test de Baarda $[-\gamma, \gamma]$ par lecture dans la table inverse de la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite. D'après la définition du résidu normé de l'équation 3c, la condition (c) peut s'écrire :

$$-\gamma s_0 q_{vv} \leq \hat{V} \leq \gamma s_0 q_{vv}$$

Expression dans laquelle q_{vv} est un vecteur réel de taille n contenant les racines carrées des éléments diagonaux de la matrice des cofacteurs $Q_{\hat{V}}$

sur les résidus, autrement dit les quantités de l'équation 3c. En supposant les conditions (a) et (b) satisfaites, et en utilisant les équations 5 et 6, il vient :

$$-\gamma s_0 q_{vv} \leq R^{-1}\beta y \leq \gamma s_0 q_{vv} \quad (\text{éq. 8})$$

Notre recherche d'un vecteur d'erreur E satisfaisant aux conditions (a), (b) et (c), est ainsi équivalente à trouver un vecteur réel y de taille $n-m$, satisfaisant aux équations 7 et 8.

Une possibilité est alors de considérer la solution \hat{z} du problème de programmation quadratique (QP) :

$$\max_{z \in \mathbb{R}^{n-m}} \Phi(z) = z^T z \quad (\text{éq. 9})$$

s.c. $z \in U$

Dans ce problème, l'ensemble des solutions admissibles correspond au polyèdre :

$$U = \{u \in \mathbb{R}^{n-m} \text{ tq } -\gamma s_0 q_{vv} \leq R^{-1}\beta u \leq \gamma s_0 q_{vv}\} \quad (\text{éq. 10})$$

Considérons également la sphère de rayon r en dimension $n-m$ définie par :

$$S_r = \{u \in \mathbb{R}^{n-m} \text{ tq } u^T u = r^2\}$$

Par définition, toute solution du problème de l'équation 9 remplit les conditions (a) et (c). Si cette solution est telle que $\Phi(\hat{z}) \geq (n - m) s_0^2$, alors il suffit de projeter la solution \hat{z} sur la sphère $S_{s_0\sqrt{n-m}}$, orthogonalement à la sphère, pour trouver une valeur \hat{y} satisfaisant à la condition (b). Certes, \hat{y} n'est plus la solution du problème de l'équation 9, mais comme il se trouve à l'intérieur du polyèdre U , il remplit les conditions (a) à (c). Si $\Phi(\hat{z}) < (n - m) s_0^2$ alors il n'est pas possible de trouver un vecteur y satisfaisant les conditions (a) à (c) et la solution \hat{z} est celle qui remplit au plus près la condition (b). Il peut être alors intéressant de remplacer la condition (b) par la condition (b') suivante : (b') Au seuil de confiance p choisi, le test du chi-deux est validé.

La condition (b') permet ainsi de considérer la région d'acceptation $[\gamma_1, \gamma_2]$ du test du chi-deux au seuil p , et de chercher la projection de \hat{z} sur la sphère plutôt $S_{s_0\sqrt{\gamma_1}}$ que sa projection sur la sphère $S_{s_0\sqrt{n-m}}$.

Étant donné que la fonction quadratique présente dans la fonction objectif est la matrice identité, donc symétrique

définie positive, ce problème est de type NP-Difficile (cf. [12]) et est appelé un problème d'optimisation quadratique non convexe. La difficulté dans la recherche d'une solution de ce problème est qu'un maximum local ne correspond pas forcément à un maximum global. Dans [13], plusieurs méthodes pour résoudre un problème QP dans le cas non convexe sont décrites. Les méthodes les plus récentes utilisent des techniques de séparation et évaluation (*Branch and Bound* - B&B), où la partie séparation est basée sur les conditions du premier ordre de Karush-Kuhn-Tucker (cf. [11]) et où des relaxations polyédrales semi-définies sont résolues à chaque nœud du processus B&B (cf. [5] et [7]).

Une autre méthode, plus simple et plus adaptée à notre cas, est d'utiliser une méthode d'énumération de sommets telles que celles décrites dans [1] et [4]. L'objectif des méthodes d'énumération est de fournir l'ensemble des sommets d'un polyèdre. Sachant que la solution du problème de l'équation 9 se trouve forcément sur un sommet du polyèdre U , on peut alors pour chaque sommet calculer la valeur de la fonction objectif et déduire la solution du problème de l'équation 9.

Le point de départ des méthodes d'énumération est de partir du fait que pour un polyèdre tel que défini dans l'équation 10, un point u est un sommet du polyèdre U , si et seulement si, il est l'unique solution d'un sous-ensemble de $n-m$ inéquations indépendantes résolues comme des équations. Les avantages de telles méthodes sont d'une part leur simplicité de mise en œuvre par rapport aux méthodes de résolution d'un problème QP non convexe, et d'autre part, le fait que, pour notre besoin, elles peuvent être stoppées dès lors que l'on trouve un sommet $u \in U$ tel que $u^T u \geq (n - m) s_0^2$.

Afin d'illustrer la méthode, nous avons généré, avec un seuil de confiance de 87 %, pour chacun des réseaux, 10 jeux d'observations, en prenant soin à chaque fois d'utiliser un sommet différent du polyèdre U , afin d'obtenir des vecteurs d'erreurs différents, même si, du fait de la forme du polyèdre, les coordonnées des différents sommets

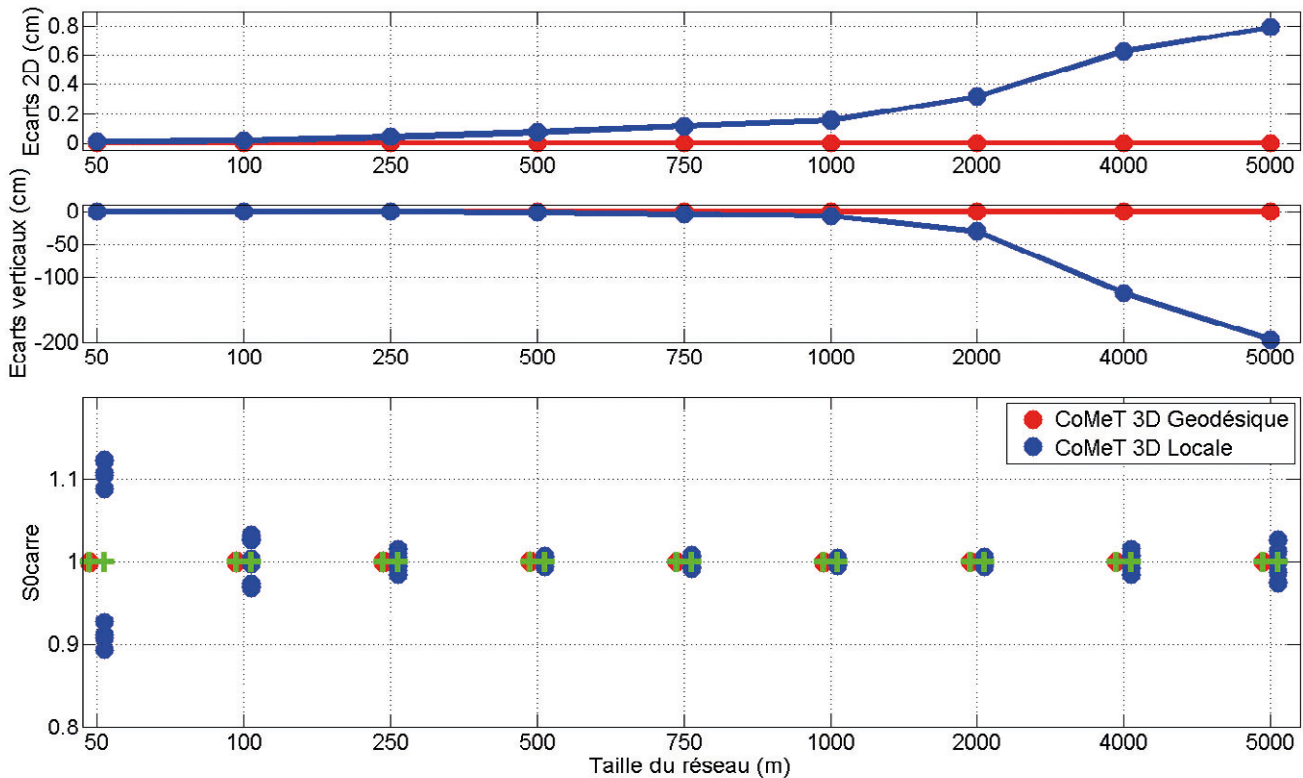


Figure 5. En haut, écarts entre coordonnées ajustées et théoriques sur les composantes planimétriques pour chaque taille de réseau et chacun des 10 jeux de mesures taille de réseau. Au milieu, écarts sur les coordonnées verticales. En bas, valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance pour chacun des 10 jeux simulés pour chaque taille de réseau suivant les deux modèles fonctionnels utilisés.

peuvent parfois être très semblables. Ces jeux d'observations générés ont été ajustés en utilisant le modèle fonctionnel 3D Géodésique ainsi que le modèle 3D Locale de CoMeT. La *figure 5* présente les résultats obtenus en termes d'écarts aux coordonnées théoriques planes et verticales mais également de valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance.

Le premier constat que l'on peut faire sur cette *figure 5* est que pour le modèle 3D Géodésique qui a servi à générer les observations, les écarts obtenus entre coordonnées ajustées et théoriques sont nuls. Les mesures générées respectent bien la condition (a). On remarque également avec ce modèle fonctionnel que les valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance sont toutes identiques et égales à 1. Les mesures générées respectent donc bien la condition (b).

Le second constat est que lors de l'ajustement des mesures avec le modèle fonctionnel 3D Locale, les résultats obtenus pour chaque réseau sont identiques pour chacun des 10 jeux de mesures. Ces résultats sont identiques

à ceux de la *Figure 2*, où l'on considérerait un vecteur d'erreurs nul. Ainsi, les écarts constatés sont uniquement liés à la différence de modèle fonctionnel.

La *Figure 5* (bas) présente les valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance pour chaque jeu de mesures ajusté, pour chacun des modèles fonctionnels, avec en vert les valeurs moyennes sur les 10 jeux par taille de réseau. On constate que pour le modèle fonctionnel 3D Géodésique (courbe rouge), la valeur de l'estimateur est toujours égale à 1, conformément au critère (b). Pour le modèle fonctionnel 3D locale, les valeurs obtenues sont en moyenne égales à 1, mais avec étendues pouvant atteindre 0.2 pour le réseau à 50 m. Cela nous permet là encore de juger la présence de modèles fonctionnels différents.

Conclusion

Cet article fait suite à celui publié dans la revue en 2012, sur la validation du logiciel CoMeT par comparaison à d'autres logiciels d'ajustement, sur la base d'observations générées sur

des réseaux de géométrie particulière. Après avoir présenté et illustré quelques méthodes classiques permettant de générer un vecteur d'erreurs à ajouter aux mesures théoriques (issues d'un modèle fonctionnel particulier), nous avons détaillé notre méthodologie particulière de génération.

Cette méthode, dont l'idée était déjà présente dans l'article de 2012, s'est surtout développée d'un point de vue théorique entre 2013 et 2015. Elle permet d'assurer que le vecteur d'erreurs E ajouté aux mesures théoriques conduira, lors de l'ajustement avec le même modèle fonctionnel, à valider les deux tests classiques réalisés à l'issue d'un traitement par moindres carrés : test du chi-deux et test de Baarda. Notre méthodologie assure également dans ce cas que la solution ajustée correspond exactement à la solution théorique pour les paramètres. Ces caractéristiques permettent de faciliter l'analyse des résultats de comparaisons sur des jeux de données où l'on fait varier un ou plusieurs paramètres (taille du réseau, hauteur de point...).





Cette méthode de génération du vecteur d'erreurs E est intégrée dans le logiciel CoMeT, et nous avons montré, sur un exemple pratique, son fonctionnement effectif. ●

Contact

Stéphane DURAND

École supérieure des géomètres et topographes
Laboratoire géomatique et foncier
stephane.durand@lecnam.net

Références

- [1] D. Avis and K. Fukuda, *A pivoting algorithm for convex hulls and vertex enumeration of arrangements and polyhedra*, Discrete Comput. Geom. 8 (1992), 295-313.
- [2] W. Baarda, *A Testing Procedure for use in Geodetic Networks*, Delft, Computing Centre of the Delft Geodetic Institute, 97 pages, 1964.
- [3] George E. P. Box, Mervin E. Muller, « *A Note on the Generation of Random Normal Deviates* », The Annals of Mathematical Statistics Vol. 29, No. 2 (Jun., 1958), pp. 610-611
- [4] D. Bremner, K. Fukuda, and A. Marzetta. *Primal-dual methods for vertex and facet enumeration*. Discrete Comput. Geom., 20 (1998), 333-357.

- [5] Samuel Burer and Dieter Vandembussche, *A finite branch-and-bound algorithm for nonconvex quadratic programming via semidefinite relaxations*, Math. Program., Ser. A 113 (2008), 259-282.
- [6] W.F. Caspary *Concepts of network and deformation analysis*. Edited by. J. M. Rüeger. Third (corrected) Impression, 2000.
- [7] Jieqiu Chen, Samuel Burer, *Globally solving nonconvex quadratic programming problems via completely positive programming*. Mathematical Programming Computation 4, Issue 1 (2012), pp 33-52.
- [8] Dach R., Lutz S., Walser P. and Fridez P., *Bernese GNSS software version 5.2*, Astronomical Institute, University of Bern, 2015
- [9] Durand S. et Guérin C., *Validation du logiciel CoMeT d'ajustement de mesures topographiques*, Revue XYZ n°132, pp32-40, 3^e trimestre 2012
- [10] Durand S., *CoMeT-Compensation de Mesures Topographiques*, Manuel utilisateur, Laboratoire Géomatique et Foncier, Cnam, 2017 (<http://comet.esgt.cnam.fr>)
- [11] Kuhn, H. W.; Tucker, A. W. (1951). « *Nonlinear programming* ». Proceedings of 2nd Berkeley Symposium. Berkeley: University of California Press. pp. 481-492. MR 0047303.
- [12] P. M. Pardalos, S. A. Vavasis, *Quadratic*

programming with one negative eigenvalue is NP-hard, J. Global Optim., 1(1), 15-22, 1991.

[13] P. Pardalos, *Global optimization algorithms for linearly constrained indefinite quadratic problems*, Comput. Math. Appl., 21, 87-97, 1991.

[14] Sillard, Patrick, *Estimation par moindres carrés*, Collection ENSG-IGN, Hermès, Lavoisier, 2001

ABSTRACT

In a previous paper, published in 2012 in this journal, we conducted comparisons between the CoMeT software and others least squares network adjustment applications in order to validate the CoMeT application. To perform such comparisons, we generated several sets of measurements in networks sharing the same geometry but different side lengths, and compared the obtained results in terms of adjusted coordinates and estimated variance factor. The purpose of this contribution is to review and discuss some common methods used for generating observations and to present in more detail our method, the one used in the previous article, which present some specific properties.

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 : stoelzelr@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

Les représentations planes cylindriques de la Terre

■ Françoise DUQUENNE

Cet article est la suite d'une série d'articles de la revue XYZ commencée au numéro 154, et qui traite des systèmes de références et de coordonnées géodésiques [1][2][3]. Son objectif est de rappeler les concepts fondamentaux des représentations planes cylindriques de la Terre, tout particulièrement celles qui sont conformes dont la plus connue et utilisée dans le monde entier est l'Universal Transverse Mercator (UTM). Il a pour ambition d'expliquer d'où viennent des algorithmes que l'on peut trouver complexes et mystérieux. Les notions générales sur les représentations planes présentées dans l'article [3] seront utilisées sans être rappelées ici. Les représentations méricylindriques, souvent utilisées pour de la cartographie à très petite échelle ne seront pas abordées ici.

MOTS-CLÉS

représentation plane cylindrique, Mercator, Mercator Transverse, UTM, conforme, module linéaire, facteur d'échelle, canevass, pseudo-canevas

La Terre, débarrassée de ses reliefs est tout d'abord représentée, soit par une sphère, soit par un ellipsoïde de révolution. Puis la sphère ou l'ellipsoïde sont représentés sur un plan. Sur la sphère ou sur l'ellipsoïde un point est donné par ses coordonnées géographiques longitude et latitude : $M(\Lambda, \Phi)$ sur la sphère et $m(\lambda, \varphi)$ sur l'ellipsoïde. On note a le rayon équatorial de l'ellipsoïde, e son excentricité et R le rayon de la sphère.

Sur le plan, M image du point m est représenté par ses coordonnées cartésiennes (X, Y) souvent notée aussi (E, N) pour *Easting, Northing*.

Les représentations planes cylindriques directes

Les coordonnées planes sont telles que X ne dépend que de la longitude et Y de la latitude.

$$X = X(\lambda)$$

$$Y = Y(\varphi)$$

Les images des méridiens (λ =constantes) sont des droites parallèles à l'axe des ordonnées (OY).

Les images des parallèles (φ =constantes) sont des droites parallèles à l'axe abscisses (OX).

$X(\lambda), Y(\varphi)$ sont des fonctions définies par les propriétés de la représentation : conforme, équivalente, équidistante, aphyllactique.

La représentation Mercator directe

Il s'agit de la représentation cylindrique directe conforme. Elle est donnée par les équations :

$$X = X_c + n\lambda$$

$$Y = Y_c + n\mathcal{L}(\varphi)$$

$\mathcal{L}(\varphi)$ est la latitude isométrique (voir l'encadré 1)

X_c, Y_c, n , sont les constantes de la représentation choisies en fonction de la zone à cartographier.

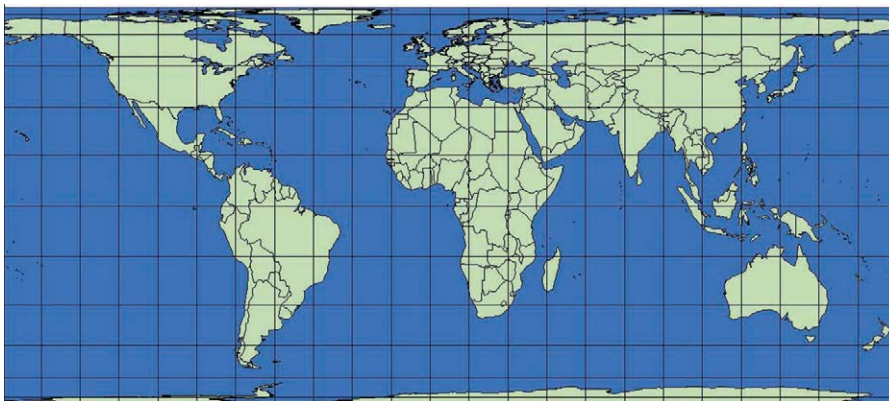


Figure 1. Cylindrique équivalente

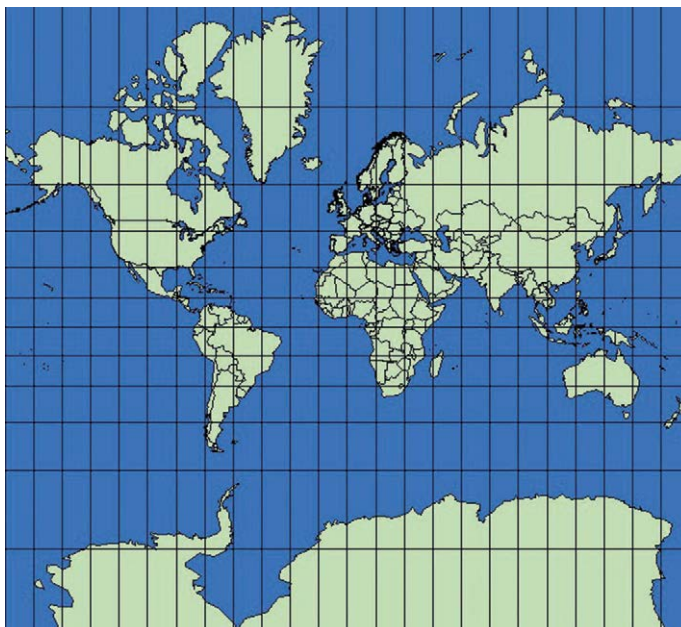
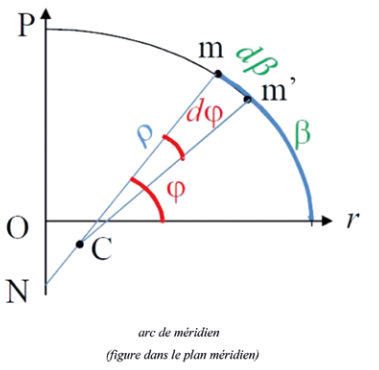


Figure 2. Cylindrique équivalente

Encadré 1 - ARC DE MÉRIDIEN



Nm : normale à l'ellipsoïde
N et V : centre et rayon de courbure de la grande normale
C et rho : centre et rayon de courbure de l'ellipse méridienne

$$v = Nm = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$$

$$\rho = \frac{d\beta}{d\varphi} = CM = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$$

v et rho sont les rayons de courbures normaux principaux de l'ellipsoïde, c'est-à-dire que dans n'importe quelle autre direction le rayon de courbure est compris entre ces deux valeurs.

$\beta(\varphi)$: longueur de l'arc de méridien de l'équateur à m

$$\beta(\varphi) = a(1 - e^2) \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$$

$\beta(\varphi)$ se calcule donc par une intégrale elliptique en remarquant que e^2 est petit. Le calcul peut se faire soit avec la méthode des intégrales de Wallis, qui est une méthode itérative, soit par développements limités

$$\beta = ab_n \varphi + a \sum_{i=1}^n b_i \sin 2i\varphi$$

$$b_0 = 1 - \frac{1}{4}e^2 - \frac{3}{64}e^4 - \frac{5}{256}e^6 - \frac{175}{16384}e^8$$

$$b_1 = -\frac{3}{8}e^2 - \frac{3}{32}e^4 - \frac{45}{1024}e^6 - \frac{105}{4096}e^8$$

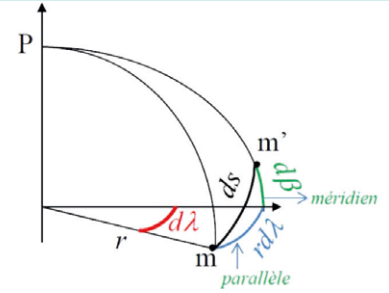
$$b_2 = \frac{15}{256}e^4 + \frac{45}{1024}e^6 + \frac{525}{16384}e^8$$

$$b_3 = -\frac{35}{3072}e^6 - \frac{175}{12288}e^8$$

$$b_4 = \frac{315}{131072}e^8$$

En développant jusqu'à l'ordre 8 on obtient le millimètre de précision.

Encadré 2 - LATITUDE ISOMÉTRIQUE



Elément de longueur sur l'ellipsoïde

$$m(\lambda, \varphi)$$

$$m'(\lambda + d\lambda, \varphi + d\varphi)$$

$d\beta$: élément d'arc de méridien

rho : rayon de courbure du méridien

r : rayon du parallèle

On calcule la distance infiniment petite ds

$$ds^2 = d\beta^2 + r^2 d\lambda^2 = \rho^2 d\varphi^2 + r^2 d\lambda^2$$

$$ds^2 = r^2 \left(\frac{\rho^2}{r^2} d\varphi^2 + d\lambda^2 \right)$$

$$\text{on pose } d\mathcal{L}^2 = \frac{\rho^2}{r^2} d\varphi^2$$

$$ds^2 = r^2 (d\mathcal{L}^2 + d\lambda^2)$$

Les coordonnées \mathcal{L} et λ sont orthogonales et symétriques.

\mathcal{L} est la latitude isométrique.

Un arc de méridien de 1° de latitude isométrique a la même longueur qu'un arc de parallèle de 1° en longitude.

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

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

$$d\mathcal{L} = \frac{(1 - e^2) d\varphi}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi) \cos \varphi}$$

$$\mathcal{L}(\varphi) = \ln \tan \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) + \frac{e}{2} \ln \frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi}$$

Latitude isométrique sur la sphère :

$$\mathcal{L}_s(\Phi) = \ln \tan \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\pi}{4} \right)$$

Calcul du module linéaire :

$$\mu = \frac{dS}{ds}$$

ds : élément de longueur sur l'ellipsoïde.

dS : élément de longueur correspondant sur le plan.

$$dS^2 = dX^2 + dY^2 = n^2 d\lambda^2 + n^2 d\mathcal{L}(\varphi)^2$$

$$ds^2 = r^2 (d\mathcal{L}^2 + d\lambda^2)$$

$$\mu^2 = \frac{n^2}{r^2}$$

$$\mu = \frac{n(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}{a \cos \varphi}$$

(Voir encadré 2)

Le module linéaire ne dépend pas de la direction, la représentation Mercator est bien conforme. Il varie avec la latitude et tend vers l'infini aux pôles. En général la représentation Mercator directe n'est en conséquence utilisée qu'entre les latitudes -80° et +80°.

Les parallèles sont des isomètres et l'équateur est l'isomètre central. Rappelons ici que l'isomètre central est tel que mu est minimum donc pour

$$\frac{d\mu}{d\varphi} = \frac{n(1 - e^2) \sin \varphi}{a \cos^2 \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} = 0$$

et finalement c'est l'équateur ($\varphi = 0$) et

$$\mu(0) = \frac{n}{a}$$

Si $n = a$, $\mu(0) = 1$, l'équateur est automécoïque et la représentation est tangente. Si $n < a$, $\mu(0) < 1$, il y a deux parallèles automécoïques et la représentation est sécante.

Les méridiens sont parallèles donc la convergence des méridiens est nulle. Comme la représentation est conforme, l'azimut est égal au gisement. Si comme les marins on voyage avec un azimut constant (cap constant en navigation), le trajet sur la carte est une droite appelée loxodromie. Sur la carte Mercator, on pourrait croire qu'elle est le chemin le plus court, mais ce n'est pas vrai sur l'ellipsoïde. L'image de la géodésique, courbe bleue sur la figure 3 est appelée orthodromie.

Le Service hydrographique de la marine (SHOM), publie ses cartes en représentation Mercator directe sécante, avec pour la latitude du parallèle sécant une latitude moyenne de la zone à cartographier et uniquement entre les latitudes (-80° et +80°).



Figure 3. Orthodromie (en rouge) et loxodromie (en bleu)

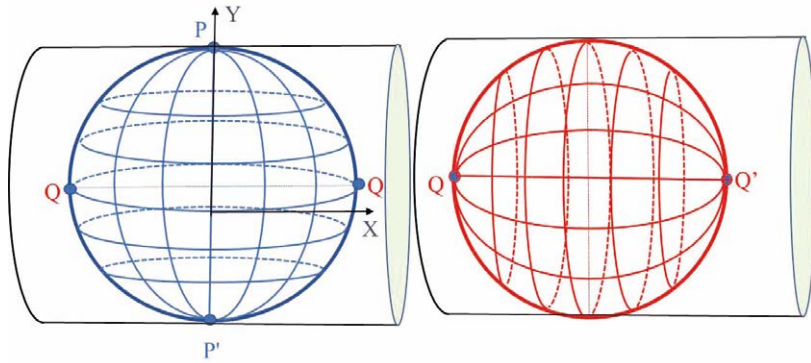


Figure 4. Canevas et pseudo-canevas transverse

Le système géodésique et l'ellipsoïde choisis sont désormais WGS84.

La représentation Mercator transverse de la sphère

L'axe du cylindre est maintenant placé dans le plan de l'équateur.

La représentation transverse Mercator de la sphère se déduit facilement de la Mercator directe en utilisant un pseudo-canevas.

- L'axe des pseudo-pôles (QQ') est dans le plan de l'équateur.
- Le pseudo-méridien origine est l'équateur.
- Le pseudo-équateur est le méridien Λ_0 .

Les coordonnées Cassini-Soldner sont :
 L : la pseudo-longitude
 H : la pseudo-latitude

Les formules de passage entre les coordonnées (λ, φ) et les pseudo-coordonnées (L, H) s'obtiennent en appliquant la trigonométrie sphérique au triangle sohrérique PMMo.

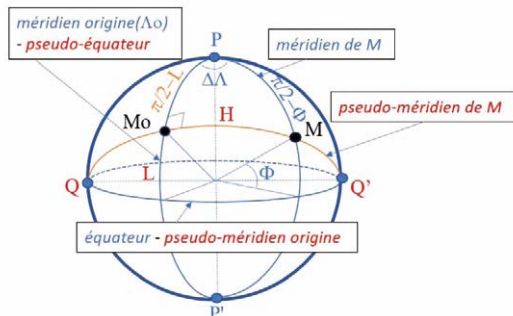


Figure 5. Pseudo-coordonnées transverse

Formule des cotangentes

$$\sin \Delta\Lambda \cot \frac{\pi}{2} = \cot \left(\frac{\pi}{2} - \Phi \right) \sin \left(\frac{\pi}{2} - L \right) - \cos \left(\frac{\pi}{2} - L \right) \cos \Delta\Lambda$$

$$\Rightarrow \tan L = \frac{\tan \Phi}{\cos \Delta\Lambda}$$

Formule des sinus

$$\frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \Phi \right)}{\sin \frac{\pi}{2}} = \frac{\sin H}{\sin \Delta\Lambda}$$

$$\Rightarrow \sin H = \sin \Delta\Lambda \cos \Phi$$

On en déduit la pseudo-latitude isométrique :

$$\mathcal{L}(H) = \ln \tan \left(\frac{H}{2} + \frac{\pi}{4} \right) = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sin H}{1 - \sin H} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sin \Delta\Lambda \cos \Phi}{1 - \sin \Delta\Lambda \cos \Phi}$$

Formule des cotangentes :

$$\sin \frac{\pi}{2} \cot \Delta\Lambda = \cot H \sin \left(\frac{\pi}{2} - L \right) - \cos \left(\frac{\pi}{2} - L \right) \cos \frac{\pi}{2}$$

$$\Rightarrow \tan \Delta\Lambda = \frac{\tan H}{\cos L}$$

Formule fondamentale :

$$\cos \left(\frac{\pi}{2} - \Phi \right) = \cos \left(\frac{\pi}{2} - L \right) \cos H + \sin \left(\frac{\pi}{2} - \Phi \right) \sin H \cos \frac{\pi}{2}$$

$$\Rightarrow \sin \Phi = \sin L \cos H$$

Enfin on obtient les formules de la Mercator transverse tangente de la sphère en appliquant les formules de la Mercator directe aux pseudo-coordonnées (L, H)

$$X = X_c + R\mathcal{L}(H) = X_c + \frac{R}{2} \ln \frac{1 + \sin \Delta\Lambda \cos \Phi}{1 - \sin \Delta\Lambda \cos \Phi}$$

$$Y = Y_c + RL = Y_c + R \arctan \left(\frac{\tan \Phi}{\cos \Delta\Lambda} \right)$$

De même on calcule le module linéaire de la Mercator transverse de la sphère :

$$\mu = \frac{1}{\cos H} = \frac{1}{(1 - \sin^2 H)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{(1 - \sin^2 \Delta\Lambda \cos^2 \Phi)^{\frac{1}{2}}}$$

On voit ici que pour $\Delta\Lambda = 0$, $\mu = 1$ donc le méridien origine est un isomètre.

Les pseudo-parallèles ($H=cste$), qui ont pour images des droites parallèles au méridien central, sont les isomètres.

La représentation Mercator transverse de l'ellipsoïde

Les méridiens de l'ellipsoïde sont des ellipses, aussi on ne peut donc pas appliquer directement la trigonométrie sphérique et on procède en trois étapes : représentation conforme de l'ellipsoïde sur une sphère, puis transformation Mercator transverse, puis mise à l'échelle constante sur le méridien central.

■ 1^{re} étape : représentation conforme de l'ellipsoïde sur la sphère

$$m(\lambda, \varphi) \rightarrow M(\Lambda, \Phi)$$

$$m(\lambda_0, \varphi_0) \rightarrow M(\Lambda_0, \Phi_0)$$

On cherche la représentation conforme

$$\Lambda = f(\lambda)$$

$$\Phi = g(\varphi)$$

telle que le module linéaire est indépendant de la direction, et donc le module linéaire selon le parallèle est égale au module linéaire selon le méridien :

$$\mu_{\text{parallèle}} = \frac{R \cos \Phi d\Lambda}{v \cos \varphi d\lambda}$$

$$\mu_{\text{méridien}} = \frac{R d\Phi}{\rho d\varphi}$$

$$\mu_{\text{parallèle}} = \mu_{\text{méridien}}$$

$$\frac{R \cos \Phi d\Lambda}{v \cos \varphi d\lambda} = \frac{R d\Phi}{\rho d\varphi}$$

$$\frac{d\Lambda}{d\lambda} = \frac{v \cos \varphi d\Phi}{\rho \cos \Phi d\varphi}$$

On intègre l'équation différentielle par la méthode des variables séparées en posant que chaque terme est constant et égal à n_s .



$$\begin{cases} n_s = \frac{d\Lambda}{d\lambda} & (1) \\ n_s = \frac{v \cos \varphi}{\rho \cos \Phi} \frac{d\Phi}{d\varphi} & (2) \end{cases}$$

Intégration

$$(1) \rightarrow (\Lambda - \Lambda_0) = n_s (\lambda - \lambda_0)$$

$$(2) \rightarrow \frac{d\Phi}{\cos \Phi} = n_s \frac{\rho}{v \cos \varphi} d\varphi$$

$$\int \frac{d\Phi}{\cos \Phi} = \int \frac{n_s (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi) \cos \varphi} d\varphi$$

$$\mathcal{L}_s(\Phi) - \mathcal{L}_s(\Phi_0) = n_s (\mathcal{L}_e(\varphi) - \mathcal{L}_e(\varphi_0))$$

$\mathcal{L}_s(\Phi)$: latitude isométrique sur la sphère.

$\mathcal{L}_e(\varphi)$: latitude isométrique sur l'ellipsoïde.

Voir encadré 2

Module linéaire :

$$\mu = \mu_{\text{parallèle}} = \frac{R \cos \Phi d\Lambda}{v \cos \varphi d\lambda}$$

$$\begin{aligned} \mu &= n_s \frac{R \cos \Phi}{v \cos \varphi} \\ &= n_s \frac{R \cos \Phi}{a \cos \varphi} (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Les parallèles sont des isomètres.

Soit $\varphi = \Phi_0$ l'isomètre central, par définition $\mu(\Phi_0)$ est minimal donc :

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\mu}{d\varphi} \right)_{\Phi_0} &= 0 \\ \left(\frac{d\mu}{d\varphi} \right) &= \mu \frac{(1 - e^2)(\sin \varphi - n_s \sin \Phi)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi) \cos \varphi} \\ \Rightarrow n_s &= \frac{\sin \varphi_0}{\sin \Phi_0} \end{aligned}$$

$$\mu(\Phi_0) = \mu_0 = n_s \frac{R \cos \Phi_0}{v_0 \cos \varphi_0}$$

Il y a plusieurs façons de choisir la sphère intermédiaire :

1^{er} cas : Sphère bitangente (tangente au méridien et au parallèle)(Figure 6)

$$\begin{aligned} n_s &= 1 \\ \Phi_0 &= \varphi_0 \\ R &= \mu_0 v_0 \end{aligned}$$

On choisit donc : Φ_0, μ_0 selon la zone à cartographier.

Pour $\mu_0 < 1$ on dit que la sphère est bitangente avec facteur d'échelle.

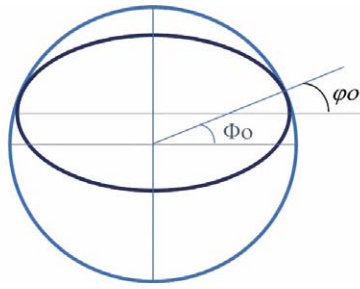


Figure 6. Sphère bitangente

2^e cas : Sphère équatoriale (Figure 7)

$$n_s = 1$$

$$R = \mu_0 v_0 \frac{\cos \varphi_0}{\cos \Phi_0}$$

$$R \cos \Phi_0 = \mu_0 v_0 \cos \varphi_0$$

On choisit Φ_0, μ_0 selon la zone à cartographier.

Pour $\mu_0 = 1$ le rayon du parallèle Φ_0 est égal au rayon du parallèle.

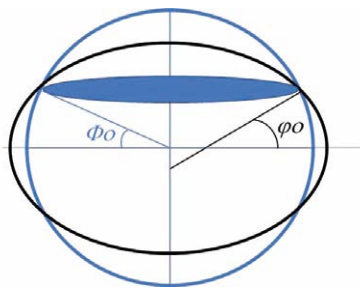


Figure 7. Sphère équatoriale

3^e cas : Sphère de courbure totale

$$R = \mu_0 \sqrt{v_0 \rho_0} = \mu_0 \frac{a(1 - e^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - e^2 \sin^2 \varphi_0}$$

$$n_s = \sqrt{(1 + e^2 \cos^4 \varphi_0)}$$

$$e^2 = \frac{e^2}{1 - e^2} : \text{seconde excentricité}$$

$$\cos \Phi_0 = \frac{\cos \varphi_0 (1 + e^2 \cos^2 \varphi_0)}{(1 + e^2 \cos^4 \varphi_0)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\sin \Phi_0 = \frac{\sin \varphi_0}{(1 + e^2 \cos^4 \varphi_0)^{\frac{1}{2}}}$$

■ Etape n°2 : Mercator transverse tangente à la sphère intermédiaire

On applique la représentation Mercator transverse tangente à la sphère intermédiaire choisie :

$$\begin{aligned} X &= X_c + R\mathcal{L}(H) \\ &= X_c + \frac{R}{2} \ln \frac{1 + \sin \Delta\Lambda \cos \Phi}{1 - \sin \Delta\Lambda \cos \Phi} \\ Y &= Y_c + RL \\ &= Y_c + R \arctan \left(\frac{\tan \Phi}{\cos \Delta\Lambda} \right) \end{aligned}$$

Le module linéaire est le produit des modules linéaires des deux représentations

• représentation conforme de l'ellipsoïde sur la sphère :

$$\mu = n_s \frac{R \cos \Phi}{a \cos \varphi} (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}$$

• représentation Mercator transverse de la sphère :

$$\mu = \frac{1}{(1 - \sin^2 \Delta\Lambda \cos^2 \Phi)^{\frac{1}{2}}}$$

On voit que pour $\Delta\Lambda = 0$, μ varie avec la latitude quelle que soit la sphère intermédiaire choisie. Donc sur le méridien origine le module linéaire n'est pas constant, et le méridien origine n'est pas un isomètre.

Les représentations Gauss-Laborde ou de Gauss-Schreiber sont définies ainsi. La représentation Gauss-Laborde a été utilisée pour l'île de la Réunion, dans le système géodésique Piton des neiges (IGN 1949) avec l'ellipsoïde International (Hayford 1909).

■ 3^e étape : Le module linéaire sur le méridien origine est rendu constant.

Pour les représentations GAUSS-KRÜGER et UTM le module linéaire est rendu constant sur le méridien central. Par anglicisme ce module linéaire est renommé facteur d'échelle et noté k_0 . Plusieurs algorithmes de calcul existent, la plupart utilisent des développements limités et on donnera ci-dessous en exemple l'algorithme développé et utilisé à l'IGN depuis 1955 qui a l'avantage de comporter des formules exactes, faciles à programmer. Comme cela a été montré dans l'article [8] cet algorithme donne les mêmes résultats pour un fuseau de grande étendue que des algorithmes plus récents avec des développements limités poussés à des degrés supérieurs.

Pour établir les formules directes, on se



Encadré 3 - MERCATOR TRANSVERSE : FORMULES DIRECTES $\lambda, \varphi \mapsto X, Y$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

$$n_s = (1 + e'^2 \cos^4 \varphi)^{1/2}$$

$$V = (1 + e'^2 \cos^2 \varphi)^{1/2}$$

$$X = X_c + \frac{k_0 a (1 + e'^2)^{1/2}}{2V^2} \ln \frac{1 + \frac{V}{n_s} \cos \varphi \sin(n_s \Delta\lambda)}{1 - \frac{V}{n_s} \cos \varphi \sin(n_s \Delta\lambda)}$$

$$Y = Y_c + k_0 \beta + k_0 a \frac{(1 + e'^2)^{1/2}}{V^2} \left(\arctan \frac{\tan \varphi}{V \cos(n_s \Delta\lambda)} - \arctan \frac{\tan \varphi}{V} \right)$$

calcul de β , arc de méridien depuis l'équateur voir encadré 2

sert d'une sphère de courbure totale, tangente à l'ellipsoïde au point à transformer, donc de rayon

$$R = k_0 \sqrt{\rho} = \frac{ak_0(1 - e'^2)^{1/2}}{1 - e'^2 \sin^2 \varphi} = \frac{ak_0(1 + e'^2)^{1/2}}{1 + e'^2 \cos^2 \varphi}$$

Voir encadré 3

Les paramètres de définition d'une représentation Mercator Transverse sont donc :

- (λ_0, φ_0) : coordonnées de l'origine
- X_c, Y_c : coordonnées planes de l'origine
- λ_0 : longitude du méridien central
- k_0 : facteur d'échelle (module linéaire) sur le méridien central.
- a, e : rayon équatorial, excentricité de l'ellipsoïde.

Les formules inverses utilisent une sphère de rayon de courbure total, tangente à l'ellipsoïde au point de latitude φ_1 , de longitude λ_0 . Ce point est sur le méridien central du fuseau et son ordonnée est celle du point à transformer.

Voir l'algorithme dans l'encadré 4.

La représentation UTM (Universal Transverse Mercator)

C'est un ensemble de représentations Mercator transverses que l'on applique à la Terre entière en divisant l'ellipsoïde en 60 fuseaux de 6°, numérotés de 1 à 60 dans le sens direct. Le méridien de Greenwich est donc la limite entre les fuseaux 30 et 31.

On applique une Mercator transverse à chacun de ces fuseaux en appliquant des paramètres standards.

- la latitude de l'origine est $\varphi_0 = 0$
- la longitude du méridien central du fuseau de numéro n_f est : $\lambda_{0,n_f} = 6^\circ \times n_f - 183^\circ$
- la constante k_0 vaut 0,9996

- l'abscisse du méridien central est fixée à $X_c = 500000$ m
- dans l'hémisphère nord $Y_c = 0$
- dans l'hémisphère sud, les Y sont changés en $10000000 - Y$ m

Des zones de recouvrements entre fuseaux sont prévues. La représentation UTM n'est en principe pas utilisée dans les régions polaires ($|\varphi| > 80^\circ$). Ayant été adoptée par l'OTAN, la représentation UTM est d'un emploi très répandu. Elle est utilisée avec différents ellipsoïdes et dans divers systèmes géodésiques. La représentation UTM est particulièrement bien adaptée aux pays étendus en latitude. La directive INSPIRE l'a adoptée pour le territoire européen, dans le cadre du géoréférencement précis, avec le système géodésique ETRS89, et l'ellipsoïde GRS80.

La France y est représentée sur les 3 fuseaux 30, 31 et 32.

Encadré 4 - MERCATOR TRANSVERSE : FORMULES INVERSES $X, Y \mapsto \lambda, \varphi$

$$\varphi_1 = \frac{Y - Y_c}{k_0 a}$$

$$n_{s1} = (1 + e'^2 \cos^4 \varphi_1)^{1/2} \quad V_1 = (1 + e'^2 \cos^2 \varphi_1)^{1/2}$$

$$\xi = \frac{(X - X_c) V_1^2}{k_0 a (1 + e'^2)^{1/2}}$$

Calcul de $\beta(\varphi_1)$ voir encadré n°1

$$\eta = (Y - Y_c - k_0 \beta(\varphi_1)) \frac{V_1^2}{k_0 a (1 + e'^2)^{1/2}} + \arctan \frac{\tan \varphi_1}{V_1}$$

$$\Delta\lambda = \frac{1}{n_1} \arctan \frac{\tan \left(2 \arctan(\exp \xi) - \frac{\pi}{2} \right)}{\cos \eta}$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$$

$$\Phi = \arctan(\cos(n_{s1} \Delta\lambda) \tan \eta)$$

$$\Phi_1 = \arctan \frac{\tan \varphi_1}{V_1}$$

$$\mathcal{L}(\varphi_1) = \ln \tan \left(\frac{\Phi_1 + \frac{\pi}{4}}{2} \right) + \frac{e}{2} \ln \frac{1 - e \sin \Phi_1}{1 + e \sin \Phi_1}$$

$$\mathcal{L}_s(\Phi_1) = \ln \tan \left(\frac{\Phi_1 + \frac{\pi}{4}}{2} \right)$$

$$\mathcal{L}(\varphi) = \mathcal{L}(\varphi_1) + \frac{1}{n_{s1}} (\mathcal{L}_s(\Phi) - \mathcal{L}_s(\Phi_1))$$

Calcul itératif de la latitude en radians :

$$\varphi_0 = 2 \arctan(\exp \mathcal{L}(\varphi)) - \pi / 2$$

$$\varphi_{i-1} = 2 \arctan \left(\left(\frac{1 + e \sin \varphi_i}{1 - e \sin \varphi_i} \right)^{e/2} \exp \mathcal{L}(\varphi) \right) - \pi / 2$$

4 itérations : $\varphi = \varphi_5$



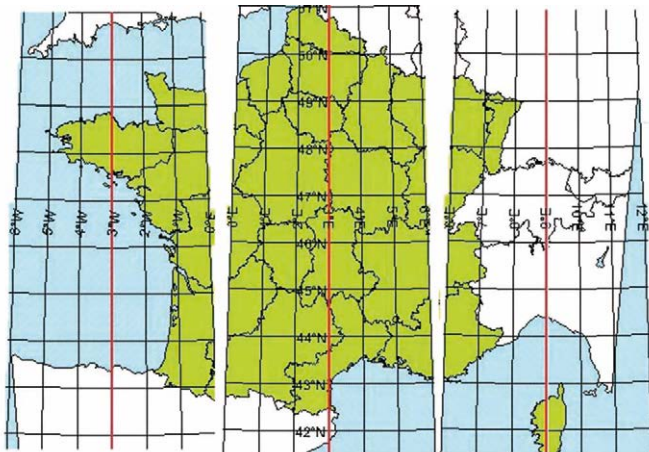


Figure 8. UTM fuseaux 30, 31, 32 sur la France

Encadré 5 - MERCATOR TRANSVERSE : MODULE LINÉAIRE(k) ET CONVERGENCE DES MÉRIDIENS (γ)

$$k = k_0 \left(1 + \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2} \cos^2 \varphi (1 + e'^2 \cos^2 \varphi) + \frac{(\lambda - \lambda_0)^4}{24} \cos^4 \varphi (5 - 4 \tan^2 \varphi) \right)$$

$$\gamma = (\lambda_0 - \lambda) \sin \varphi \left(1 + \frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{3} \cos^2 \varphi (1 + 3e'^2 \cos^2 \varphi + 2e'^4 \cos^4 \varphi) + \frac{(\lambda - \lambda_0)^4}{15} \cos^4 \varphi (2 - \tan^2 \varphi) \right)$$

▶ L'UTM est aussi utilisée dans les territoires français d'outremer Guadeloupe (fuseau 20), Guyane (fuseau 22), Martinique (fuseau 20), Mayotte (fuseau 38), Réunion (fuseau 40), Saint-Barthélemy (fuseau 20), Saint-Martin (fuseau 20), Saint-Pierre-et-Miquelon (fuseau 21), Terre Adélie (fuseaux 52 à 54). Les systèmes géodésiques et les ellipsoïdes associés sont donnés sur le site web geodesie.ign.fr et comme pour certains territoires l'UTM est utilisée avec l'ancien et le nouveau système géodésique une attention particulière doit y être portée.

Comme toute représentation conforme, les équations de la représentation Mercator transverse peuvent être écrites avec des fonctions complexes en particulier les fonctions hyperboliques. Dans cet article on n'a pas choisi ce formalisme parce qu'il semble que l'agilité de manipulation des complexes se raréfie de nos jours et que les langages de programmations souvent l'ignorent. Cependant les adeptes pourront se faire plaisir en lisant les références [5] et [9]. ●

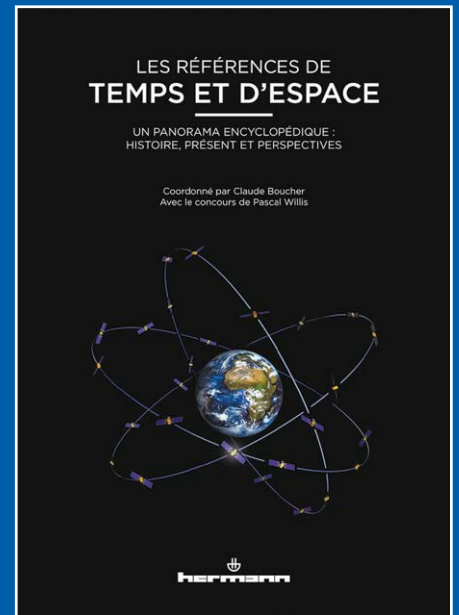
Références

[1] Duquenne F., 2018 *Le CNIG et les références géodésiques XYZ* n°154 pages 44-45
 [2] Duquenne F., 2018 *Les systèmes de référence terrestre et leurs réalisations*, XYZ n°154 pages 46-54

[3] Duquenne F., 2018 *Les représentations planes de la Terre*, XYZ n°156 pages 36-42
 [4] Duquenne F. et H., 2003, *cours de géodésie*, ESGT/CNAM
 [5] Boucher C., 1984, *Les projections de Mercator transverses*, IGN/SGN NT/G n°19
 [6] Levallois, J.J. 1970, *Géodésie Générale tome 2 : géodésie classique bidimensionnelle*, Eyrolles
 [7] Dufour H.M., 1969, *La projection UTM-Calculs électroniques*, IGN/Géodésie/DEC
 [8] Gourine and al. 2018, *Extension de fuseau de la projection de Mercator Transverse*, XYZ n°155 pages 45-53
 [9] IGN/SGN 1995, *Projection cartographique MERCATOR TRANSVERSE*, algorithmes, NT/G 76

ABSTRACT

The purpose of this paper is to recall the fundamental concepts of the plane cylindrical representations of the Earth, especially those which are conformal. Amongst these, the most known and used projection throughout the world is the Universal Transverse Mercator (UTM). The algorithm of calculation presented here, developed by French IGN, has the advantage of using exact formulas and not limited developments like many others, and thus of being easily computerized.



COMMANDEZ "LES RÉFÉRENCES DE TEMPS ET D'ESPACE" AU PRIX DE 35,00 €
 17 x 24 cm, 484 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

Étude de faisabilité et choix optimal d'une station RIMS d'EGNOS en Algérie

■ Tabti LAHOUIA - Kahlouche SALEM - Benadda BELKACEM

Les performances du système EGNOS ont été évaluées en matière de disponibilité au travers des variables suivantes : les niveaux de protection HPL et VPL (Horizontal and Vertical Protection Level) basés sur des seuils d'alarme HAL et VAL (Horizontal and Vertical Alarm Limit) et l'analyse de l'erreur ionosphérique. Pour effectuer notre étude, nous avons opté pour cinq aéroports à savoir : Tamanrasset, Ghardaïa, Laghouat, Ouargla et Timimoun, ces sites ont été ajoutés aux réseaux actuels des stations RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations) du système EGNOS. En Algérie, nous avons constaté que le système EGNOS permet d'avoir une bonne couverture au Nord, par contre ; en se dirigeant vers le Sud cette couverture s'affaiblit. La mise en place d'une station au centre de l'Algérie permettrait une bonne exploitation du système et en même temps étendrait la zone de couverture. Les résultats de simulation de la station Ghardaïa montrent qu'en Algérie les performances du système EGNOS deviennent meilleures, en particulier dans la zone comprise entre $[0^\circ, 5^\circ]$ en longitude et de 30° en latitude.

Introduction

Les GNSS (Global Navigation Satellite System) parmi lesquels le système américain GPS (Global Positioning System) ont tous pour objectif principal de donner la position et la vitesse d'un utilisateur à tout instant, en tout lieu et dans un référentiel global. La modernisation du GPS, du système Russe GLONASS et l'arrivée de nouvelles constellations, à l'instar de Galileo pour l'Europe ou de Beidou pour la Chine, et même les systèmes d'augmentation créeront de nouvelles applications innovantes.

Les systèmes d'augmentation spatiaux ou SBAS pour "Space Based Augmentation Systems" sont des systèmes de radionavigation par satellites destinés à compléter les systèmes GNSS pour fournir conjointement des performances supérieures en termes de précision de positionnement, de disponibilité, de continuité du service et d'intégrité des informations fournies. Ces systèmes permettent la transmission des corrections différentielles et des messages d'intégrité pour les satellites de navigation qui sont en vue par un réseau de stations de référence.

MOTS-CLÉS

EGNOS, GPS, niveau de protection, alarme limite, correction ionosphérique, stations RIMS.

Plusieurs nations ont mis en place leur propre système d'augmentation satellitaire ; ainsi, les Européens ont mis en place le SBAS nommé EGNOS : European Geostationary Navigation Overlay Service. Il couvre le continent européen et s'appuie sur un segment spatial de 3 satellites géostationnaires (PRN 120, PRN 123 et PRN 136) et sur un réseau de stations terrestres composé des stations de références RIMS, des stations MCC de calcul (Mission Control Centres) et des stations de transmission NLES (Navigation Land Earth Stations). Les stations RIM comprenant 39 stations pour lequel la station d'Agadir (Maroc) a été ajoutée à la fin de



Figure 1. Distribution géographique des stations RIMS du système EGNOS [ESSP, 2015]

2013 et la station de Djerba (Tunisie) est opérationnelle depuis 2009. La distribution géographique de ces stations est donnée par la figure 1.

Messages transmis par EGNOS

Le système EGNOS diffuse ses messages sur la bande L1 (1575.42 MHz) à un débit de 250 bits par seconde. Il utilise la même modulation que celle du GPS, mais avec un débit 5 fois plus élevé. Donc à chaque seconde un message est à la disposition de l'utilisateur sous le format suivant [ESA ; 2011] : - 8 bits de préambule, 6 bits pour identifier le type de message, 212 bits de correction actuelle d'EGNOS, et 24 bits de parité ; permettant de s'assurer que les données n'ont pas été corrompues pendant la transmission (pas d'erreur de bit).

Un total de 63 types de messages peut être transmis, mais pour l'instant seulement 20 sont définis et 18 sont utilisés par EGNOS [Jimenez-Baños D. et al. ; 2011].

■ Corrections rapides

Les corrections rapides (PRC_f) sont diffusées par EGNOS pour chaque satellite vu par les stations RIMS dont le but est de corriger les erreurs qui varient rapidement comme les erreurs d'horloge et les erreurs d'éphémérides. L'application de ces corrections est effectuée au niveau des pseudo-distances mesurées par le récepteur, en plus de cette correction, une variation de correction RRC (Range Rate Correction) est aussi ajoutée à la mesure afin de compenser celle-ci lors de la réception des messages [Guay, J.-C. ; 2010]. L'équation (1) présente le calcul de pseudo-distance corrigée [EUROCONTROL ; 2003] :

$$PR_{\text{corrigé}}(t) = PR_{\text{mesuré}}(t) + PRC_f(t_{0f}) + RRC(t - t_{0f}) \quad (1)$$



Tel que :

$$RRC(t_{of}) = \frac{PRC_{fcourant} - PRC_{fprécédent}}{t_{ofcourant} - t_{ofprécédent}} \quad (2)$$

Où : t est instant d'applicabilité, et t_{of} est le temps d'applicabilité du message le plus récent en s , $PR_{corrigé}$ est la pseudo-distance corrigée, et $PR_{mesuré}$ la pseudo-distance mesurée en (m), PRC_f est la correction rapide, et RRC est la variation de la correction en (m).

■ Corrections lentes

Le but des corrections lentes ou corrections à long terme transmises par EGNOS est :

- de corriger les erreurs qui varient lentement comme la position des satellites fournie par les éphémérides radio diffusées ;
- d'actualiser les erreurs d'horloges des satellites (δa_{f0}).

L'application des corrections lentes est effectuée au niveau du biais d'horloge et de la position des satellites dans le format WGS-84. La correction d'horloge des satellites $\delta \Delta T_{sat}$ doit être ajoutée à la correction ΔT_{sat} provenant des éphémérides du GPS [Guay J-C. ; 2010]. La mise à jour des horloges est donnée par l'équation suivante [Gillieron P.Y. ; 2004] :

$$\delta \Delta T_{sat}(t) = \delta a_{f0} + \delta a_{f1}(t - t_0) \quad (3)$$

Où t : instant d'applicabilité, et t_0 : instant de réception du message (s), $\delta \Delta T_{sat}$ est la correction d'horloge (s) ; δa_{f0} est la correction d'erreur d'horloge (s) ; δa_{f1} est la dérive de correction et elle est égale à zéro lorsque le *Velocity Code* est nul (s). La correction de pseudo-distance est donnée par :

$$RC_{clock}(t) = \delta \Delta T_{sat}(t) \times c \quad (4)$$

■ Corrections ionosphériques

Les corrections ionosphériques sont diffusées par EGNOS pour chacun des points d'une grille virtuelle située à 350 km d'altitude. Ces points sont appelés IGP (*Ionospheric Grid Points*). L'application des corrections ionosphériques par l'utilisateur se divise en cinq étapes :

1. Récupérer les points ionosphériques de la grille IGP transmise par EGNOS.
2. Récupérer le délai à chacun des IGP transmis.
3. Calculer les lignes de vue entre le récepteur et les satellites pour déter-

miner les IPP (*Ionospheric Pierce Point*). Le IPP est défini comme étant l'intersection entre la couche d'atmosphère située à 350 km d'altitude et la demi-droite ayant pour origine le récepteur, et pour direction celle du satellite GPS considéré.

4. Calculer les délais ionosphériques par interpolation aux IPP pour chacun des satellites corrigés.
5. Appliquer la correction ionosphérique correspondante (IC), elle est donnée par :

$$IC = F_{PP} \times \tau_{IPP}(m) \quad (6)$$

Tel que $\tau_{IPP}(m)$ est le délai pour chaque IPP. Le récepteur prend en compte une fonction d'élévation (F_{PP}) entre l'IPP et l'utilisateur [Arbesser-Rastburg.B ; 2002]. Le F_{PP} se calcule par :

$$F_{PP} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + h_I} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (5)$$

Où E est l'angle d'élévation du satellite par rapport à l'utilisateur (radians) ; R_e est le rayon approximatif de la Terre (6378,1363 km) ; h_I est la hauteur de la densité maximale d'électrons.

À ces trois types de corrections s'ajoutent l'information sur le système EGNOS, l'information sur la dégradation des corrections et l'information sur l'intégrité [Sauer K. ; 2003].

Pour la correction troposphérique, le système EGNOS ne transmet pas de corrections troposphériques. Elle est corrigée grâce à un modèle assez simple en utilisant la position estimée du récepteur, élévation du satellite et le jour de l'année (VanLeeuwen S. et al. ; 2004). L'estimation du retard troposphérique prend alors la forme suivante (Eurocontrol ; 2003) :

$$RC_{tropo} = -(d_{hyda} + d_{wet}) \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(Eli)}} \quad (7)$$

Avec : RC_{tropo} estimation du retard troposphérique ; Eli angle d'élévation du satellite, d_{hyda} contribution sèche au délai zénithal et d_{wet} contribution humide au délai zénithal.

La variance des résidus des corrections troposphériques est donnée par :

$$\sigma_{i,tropo} = 0.12 \times m(Eli) \quad (8)$$

$m(Eli)$ est calculé par l'équation 9 pour des angles d'élévations supérieures à 5°.

$$m(Eli) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(Eli)}} \quad (9)$$

Niveau de protection

EGNOS diffuse des paramètres permettant à l'utilisateur d'évaluer le degré de confiance dans les corrections différentielles et d'estimer une limite de son erreur de position ; ces paramètres appelés niveaux de protection (PL) définissent une zone où la position réelle de l'utilisateur se trouve avec une très haute certitude. Les niveaux de protection sont calculés à chaque instant par le récepteur en utilisant les paramètres suivants :

- UDRE : erreur de distance différentielle de l'utilisateur (*User Differential Ranging Error*), qui caractérise l'estimation des erreurs résiduelles sur les corrections orbite/horloge de chaque satellite ;
- GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*) qui décrit le niveau d'erreur des corrections ionosphériques [Perrin O. ; 2004].

Ces deux paramètres sont transmis par EGNOS, tandis que les niveaux de protection horizontale et verticale sont calculés par le récepteur, ils sont calculés par :

$$HPL = K_h \times \sigma \quad VPL = K_v \times d \quad (10)$$

Pour l'aviation civile K_h est fixé à 6 et K_v est fixé à 5.33 pour les phases PA (*Precision Approach*). Ce paramètre peut néanmoins être modifié pour d'autres applications, par exemple terrestres ou maritimes, permettant ainsi de disposer de HPL réduits pour des probabilités plus importantes. σ et d : Variance verticale et horizontale de la position estimée en fonction de la matrice G et W telle que :

$$G_i = [-\cos Eli \sin Azi \quad -\cos Eli \cos Azi \quad -\sin Eli] \quad (11)$$

= ième ligne de G

$$W = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1/\sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

σ_i^2 est la somme des variances pour chaque satellite (m^2), elle est calculée par :

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \quad (13)$$

Tel que $\sigma_{i,flt}^2$ est la variance des résidus des corrections lentes et rapides (m^2), $\sigma_{i,UIRE}^2$ est la variance des résidus des corrections ionosphériques (m^2) ; $\sigma_{i,air}^2$ est la variance des erreurs du récepteur aéroporté (m^2), elle est



donnée par l'équation (14), $\sigma_{i,tropo}^2$ est la variance des résidus des corrections troposphériques (m²) [Guay J-C. ; 2010].

$$\sigma_{i,air}^2 = \sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,multipath}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \quad (14)$$

$$\sigma_{i,multipath} = 0.13 + 0.53e^{(-ele_i/10deg)}(m) \quad (15)$$

Tel que ele_i est l'élévation du satellite. Les deux valeurs $\sigma_{i,noise}^2$, $\sigma_{i,divg}^2$ dépendent de la catégorie du récepteur GNSS.

Résultats et Analyses

L'objectif de ce travail est d'analyser l'amélioration des performances du système EGNOS atteint lors de l'introduction d'une station RIMS pour différents sites nationaux, et comme EGNOS a été destiné aux applications de la navigation aérienne, les critères de cette application ont été considérés dans cette simulation. Le choix a été porté dans un premier temps sur les stations opérationnelles en 2015 qui sont au nombre de 39 (ESSP), et dans un deuxième temps l'analyse a été faite par l'ajout d'un site national aux stations déjà opérationnelles ; cinq sites ont été testés pour évaluer les meilleures performances du système EGNOS en Algérie :

1. EGNOS actuel (39 stations, sans station en Algérie).
2. EGNOS actuel + ajout d'une station à Tamanrasset : 22°83' Nord, 5° 46' Est (choix initial de l'Agence Spatiale européenne).
3. EGNOS actuel + ajout d'une station à Ghardaïa : 30° 34' 08" Nord, 2° 51' 53" Est.
4. EGNOS actuel + ajout d'une station à Laghouat : 33° 45' 52" Nord 2° 55' 42" Est.
5. EGNOS actuel + ajout d'une station à

Ouargla : 31° 55' 53" Nord 5° 24' 24" Est.

6. EGNOS actuel + ajout d'une station à Timimoun : 29° 14' 28" Nord 0° 17' 01" Est.

Ces tests ont été analysés avec le logiciel SBAS Simulator de l'ESA, les résultats dépendent du choix de plusieurs paramètres (RIMS filtre, RIMSnetwork) et des conditions initiales (constellation, date, zone...) :

- date : 18 février 2015 (journée 49) ; la constellation GPS contient 30 satellites ;
- dans cette étude on a choisi une zone qui contient tout le territoire algérien, elle est déterminée par : longitude min = -10°, longitude max = 15° et latitude min = 15°, latitude max = 40° ;

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont les niveaux d'alarme (HAL et VAL) qui sont définis comme étant le maximum acceptable pour l'erreur de positionnement, ils sont fonction de la phase de vol considérée.

Pour cette étude l'approche avec guidage vertical APV I a été prise, elle est caractérisée par HAL = 40 m et VAL = 50 m [Shiun Jan S. ; 2003].

■ Choix optimal d'une station RIMS en Algérie

Le projet d'extension du système EGNOS vise à renforcer son segment terrestre dans le continent africain par l'installation de stations RIMS dans les pays concernés. Il a été prévu par l'ESA l'installation d'une station (RIMS) au niveau de l'aéroport international de Tamanrasset.

Les résultats de la simulation effectuée sur ce site ont montré que les performances du système ne peuvent

pas être atteintes sur tout le territoire algérien, mais garantissent plutôt une meilleure couverture dans la direction du réseau principal de stations RIMS (vers l'Europe, donc plus au Nord). Les conclusions tirées de cette étude ont été les suivantes [Kahlouche S., Tabti L. ; 2015] :

- les corrections fournies par chaque station RIMS dépendent des stations voisines ;
- l'amélioration de service EGNOS est interne du réseau des stations RIMS ;
- la portée entre deux RIMS est importante ; plus les stations sont voisines plus l'amélioration est importante, c'est-à-dire les stations isolées n'ont pratiquement aucune influence.

Pour toutes ces raisons, le déplacement de la station de Tamanrasset vers le centre de l'Algérie est primordial pour assurer une couverture meilleure et étendue du système EGNOS en Algérie. C'est dans ce cadre, que la suite de ce travail est portée sur l'analyse des performances du système EGNOS avec l'ajout de différents sites nationaux. Ces sites abritent des aéroports situés entre 30 et 35 degrés de latitude, en excluant ceux situés à l'extrême Ouest, proches de la station marocaine d'Agadir, ou à l'extrême Est, couverts par la station de Djerba (Tunisie).

■ Disponibilité du système EGNOS

L'utilisation des niveaux de protection (PL) offre une meilleure interprétation de la disponibilité du système EGNOS. La disponibilité d'EGNOS est calculée par rapport au pourcentage de temps où les niveaux de protection (HPL et VPL) se situent en dessous de leurs valeurs seuils (fixées pour un type d'opération par les limites d'alarme, i.e. HAL et VAL. On a deux cas :

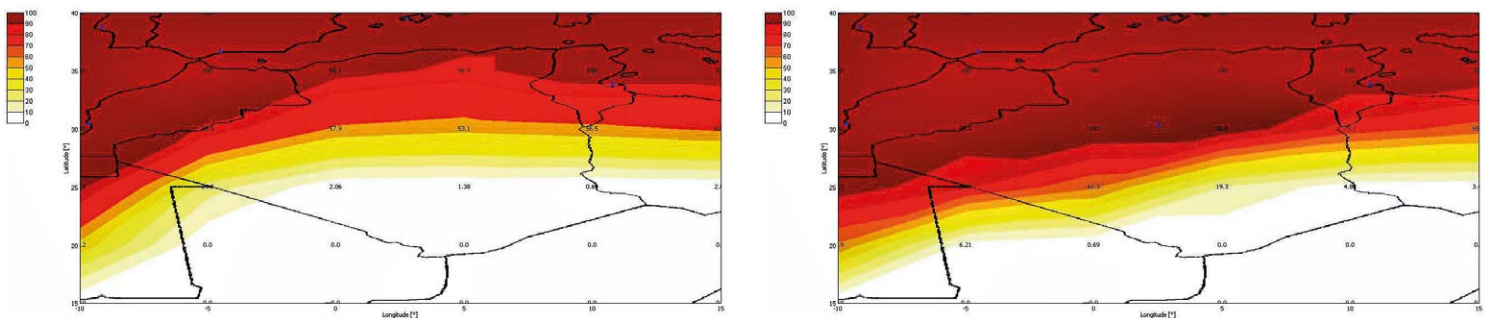


Figure 2. Disponibilité horizontale en % avec 39 stations RIMS (gauche) et 39 stations RIMS + la station de Ghardaïa (droite)



φ : Latitude λ : Longitude Sites	25° [0° 5°]	30° [0° 5°]	35° [0° 5°]
39 stations	[1.38 4.13]	[54.4 65.5]	[91.0 97.6]
39 stations + Ghardaïa	[22.0 66.9]	[98.6 100]	100
39 stations + Laghouat	[8.27 12.4]	[72.4 81.3]	100
39 stations + Ouargla	[14.4 22.7]	[88.9 83.4]	100
39 stations + Timimoun	[13.1 62.0]	[95.8 80.0]	100

Tableau 1. Disponibilité horizontale en % (HPL<HAL=40 m) avec 39 stations RIMS incluant le site choisi

φ : Latitude λ : Longitude Sites	25° [0° 5°]	30° [0° 5°]	35° [0° 5°]
39 stations	[1.38 4.83]	[66.9 71.0]	[96.5 97.2]
39 stations + Ghardaïa	[34.4 76.5]	[95.8 97.6]	99.3
39 stations + Laghouat	[10.3 14.4]	[89.6 92.4]	99.3
39 stations + Ouargla	[19.3 26.2]	[91.7 92.4]	99.3
39 stations + Timimoun	[29.1 74.4]	[93.7 97.9]	99.3

Tableau 2. Disponibilité verticale en % (VPL<VAL=50 m) avec 39 stations RIMS incluant le site choisi

Les résultats de simulation montrent que la disponibilité horizontale et verticale du système a été améliorée en Algérie, en particulier au nord, en incluant une station au centre de l'Algérie. Néanmoins cette disponibilité diminue en se déplaçant vers le sud. La disponibilité verticale du système EGNOS passe à plus de 95 % en incluant la station de Ghardaïa ; dans la zone comprise entre [0°,5°] en longitude et de 30° en latitude comme le montrent les figures 2 et 3.

- PL < AL Système disponible (intégrité garantie) ;
- PL ≥ AL Système non disponible (intégrité pas garantie) [Bureau. J ; 2012].

Les résultats de disponibilité en approche APV I pour les quatre sites sont donnés par les tableaux 1 et 2 pour des latitudes 25, 30 et 35 degrés et entre [0° 5°] en longitudes.

■ Erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique

L'erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique est évaluée à

partir des indicateurs de précision sur la grille ionosphérique délivrés par le système EGNOS.

φ : Latitude λ : Longitude Sites	25° [0° 5°]	30° [0° 5°]	35° [0° 5°]
39 stations	[38.3 43.1]	[4.98 12.6]	0.54
39 stations + Ghardaïa	[0.73 0.74]	0.54	0.54
39 stations + Laghouat	[32.2 35.2]	[0.55 0.56]	0.54
39 stations + Ouargla	[3.2 31.5]	[0.54 0.56]	0.54
39 stations + Timimoun	[0.66 8.54]	[0.54 0.56]	0.54

Tableau 3. σ_{GIVE} avec 39 stations RIMS incluant le site choisi en mètres

La précision de la grille de corrections ionosphériques dépend du nombre des points IPP, ce nombre est directement lié au nombre des stations au sol, plus ce nombre augmente par l'ajout des stations RIMS, plus le nombre de points IPP augmente, plus la précision des corrections ionosphériques sera meilleure.

Le calcul de sigma GIVE permet de donner l'erreur verticale de la grille ionosphérique et chaque valeur correspond aux nombres de points IPP surveillé par les points ionosphériques de la grille IGP. Les résultats de sigma GIVE varient en mètres entre 0.54 (Latitude 35°) et 43 (Latitude 25°) et sont fournis par le tableau suivant. On peut constater que l'ajout d'une station RIMS permet de diminuer les valeurs de sigma GIVE, cela est expliqué par l'augmentation de satellites surveillés donc l'augmentation du nombre de points IPP qui permettent d'améliorer la précision verticale de la grille ionosphérique.

D'après les résultats du tableau 3, on peut constater que l'ajout de la station de Ghardaïa permet d'avoir une valeur maximale de sigma GIVE égale à 0.74 m alors que sa valeur était 38.3 m avec le réseau actuel (39 stations).

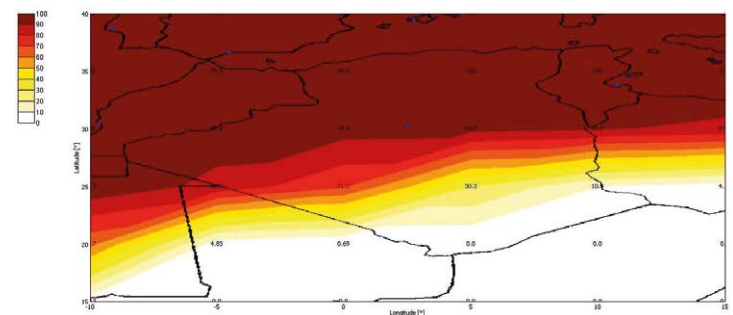
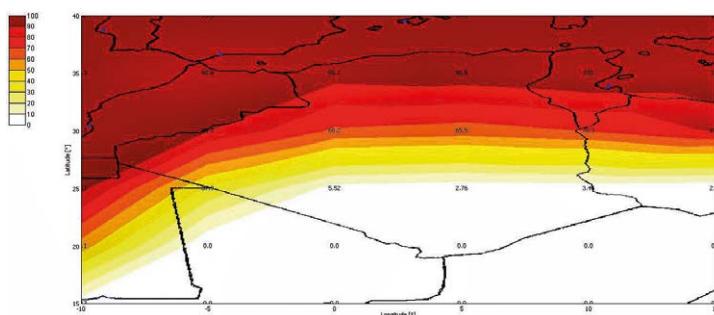


Figure 3. Disponibilité verticale en % avec 39 stations RIMS (gauche) et 39 stations RIMS + la station de Ghardaïa (droite)

Conclusion

A partir de cette étude on constate que le choix du site dépend principalement de l'application considérée en priorité, en fixant préalablement les paramètres de la simulation.

À terme de ce travail nous avons atteint notre objectif qui est de tester les performances du système EGNOS dans différents sites nationaux. Quatre sites ont été testés pour évaluer les meilleures performances du système EGNOS en Algérie.

Les tests effectués sur nos sites nous ont permis de conclure que les corrections d'EGNOS peuvent être utilisées seulement pour le territoire couvert par les stations RIMS du système. Les conclusions tirées de cette étude ont été les suivantes :

- l'ajout d'une station en Algérie permet d'augmenter la disponibilité du système et de réduire l'erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique ;
- la mise en place d'un site au centre de l'Algérie, en particulier à Ghardaïa permet d'avoir une bonne exploitation du système et en même temps étendre sa zone de couverture ;
- les sites de Ghardaïa, Laghouat, Ouargla ou même Timimoun permettent d'avoir les meilleurs résultats, spécialement au-dessus de latitude 30 degrés ; de ce fait, l'ajout de l'une de ces stations permet d'améliorer la couverture d'EGNOS.

Finalement, les critères pour sélectionner le meilleur emplacement d'une station RIMS dépendent de nombreux facteurs, non seulement techniques, mais aussi institutionnels, politiques ou réglementaires et sans oublier les considérations de sécurité. ●

Contacts

Tabti LAHOUIA - Kahlouche SALEM
Département de Géodésie Spatiale
Centre des Techniques Spatiales
Email : ltabti@cts.asal.dz

Benadda BELKACEM
Laboratoire de Télécommunications
de Tlemcen

Bibliographie

- Arbesser-Rastburg B. [2002]** : *Ionospheric Corrections for satellite navigation using EGNOS*, European Space Agency, ESA-ESTEC, TOS-EEP.
- Bureau J. [2012]** : *Définition et analyse statistique d'une mesure d'intégrité pour données GPS/EGNOS*, thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Commission des Communautés Européennes [2003]** : *Intégration du programme EGNOS dans le programme GALILEO*.
- ESA [2011]** : *GUIDE EGNOS; à l'usage des Développeurs d'Applications*. Commission Européenne, ED 2.0.
- ESSP [2015]** : <http://egnos-user-support.essp-sas.eu/>
- EUROCONTROL [2003]** : *Technical Notes on SBAS, PEG-TN-SBAS*. V, 15, 20, 21, European Space Agency (SBASimulator) ; <http://www.egnos.pro.esa.int/sbasimulator>
- Gillieron P-Y. [2004]** : *Principes et Architecture des Systèmes d'Augmentation*, Laboratoire de topométrie, EPFL. Réf : EGN-SDD EDAS, V2.0.
- Guay J-C. [2010]** : *Récepteur SBAS-GNSS logiciel pour des applications temps réel*, École De Technologie Supérieure, Université du Québec, maîtrise en génie électrique.
- Jimenez-Baños D., Powe M., Rajmather A., Toran F., Flament D., Chatre E. [2011]** : *EGNOS Open Service Guidelines for receivers manufacturers* ; 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland OR.
- Kahlouche S., Tabti L. [2015]** : *Feasibility study and site choice for an EGNOS station in Algeria*, International Committee on Global Navigation Satellite Systems, Experts Meeting on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Services. Vienna, Austria.
- Perrin O. [2004]** : *Performances d'EGNOS et applications Cours IGSO -EPFL*, Agence Spatiale Européenne.
- Sauer K. [2003]** : *Integrated high precision kinematic positioning using GPS and EGNOS observations*; thèse de doctorat, University of London.
- Shiunjan S. [2003]** : *Aircraft landing using a modernized global positioning system*

and the wide area augmentation system; thèse de doctorat, Stanford University.

Van Leeuwen S., Vander Marel H., Tossaint Mand Martelluci A. [2004] : *Validation of SBAS MOPS troposphere model over the EGNOS service area*, Naational Lucht, En Ruimtevaartlaboratorium, National Aerospace Laboratory NLR.

Ventura-Traveset J., Michel P. and Gauthier. L [2004] : *Architecture, mission and signal processing aspects of the EGNOS System: the first European implementation of GNSS*; European Space Agency (ESA).

Walter T. [2012] : *Satellite Navigation for Guidance of Aircraft*, Presented to Workshop on Science Application of GNSS in Developing.

ABSTRACT

Key world: EGNOS, GPS, protection level, alarm limit, ionospheric correction, RIMS stations.

The performance of the EGNOS system was analyzed in terms of availability through the following variables, protection level HPL and VPL (Horizontal and Vertical Protection Level) based on alarm limit (HAL Horizontal or VAL Vertical alarm Limit) and ionospheric error analysis. To carry out our study, we opted for five airports namely: Tamanrasset, Ghardaïa, Laghouat, Ouargla and Timimoun, these sites have been added to the existing networks of the RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations) stations of the EGNOS system.

In Algeria, we found that EGNOS provides good coverage in the north, however heading to the south this coverage is decreasing. The addition of one station in the center of Algeria should allow a good service of the system and at the same time should extend its coverage area. The results simulation of the Ghardaïa station show that in Algeria, the performance of EGNOS system is better, especially in the area between [0 °, 5 °] in longitude and 30 ° in latitude.

Relevé de la grotte glacée de Cenote Abyss dans les Dolomites

■ Farouk KADDED – Tommaso SANTAGATA

Situé en Italie du Nord (figure 1), le Cenote Abyss (ou grotte Conturines) est l'une des grottes les plus profondes et volumineuses de la région des Dolomites. La grotte est caractérisée par un énorme dépôt de glace au bout de 150 m, ce qui rend la cavité d'intérêt majeur pour l'étude du paléoclimat et du changement climatique dans cette région des Alpes. L'exploration spéléologique a commencé en 1994 à la suite de la brusque vidange d'un petit lac à 2940 m. Les spéléologues italiens ont remarqué la présence d'une cavité dans la glace au fond de la doline vidée et ont commencé l'exploration pendant la saison estivale. Cependant, après plusieurs expéditions il était impossible de descendre au-delà d'une profondeur de 70 m à cause de la glace et des conditions hydrologiques difficiles. Dans les années qui suivirent, le passage à travers la glace a de nouveau été fermé à cause de l'accumulation de neige en hiver. En 2015 et 2016 des expéditions ont pu se dérouler, grâce à la basse température d'automne (en dessous de zéro pendant la nuit) et entrer dans la grotte avec des conditions sèches pour explorer un énorme puits de 160 m de profondeur sous la langue de glace principale.

■ MOTS-CLÉS

Scanner laser 3D, GNSS, spéléologie, climat, drone, topographie, gouffre, Piz des Conturines

rencontrons des équipes "spéleo" et "topo", puis nous repérons des lieux. Rapidement prêts à intervenir nous montons à l'entrée du gouffre par une marche de 20 minutes en montagne.

L'équipe "topographie" est composée de Tommaso Santagata et de moi-même. Il nous faut rapidement faire le relevé de 3 points de calage au GS16 servant au géoréférencement des relevés scanner laser 3D et drone. Nous devons aussi réaliser un vol de drone pour réaliser une modélisation de la partie extérieure du gouffre.

Nous commençons par le vol de drone (DJI Phantom 4). Dix minutes de vol suffiront pour couvrir l'entrée du gouffre avec 58 photos.

Pour les mesures GNSS (figure 3), il nous faut faire face à l'absence de réseaux GNSS et GSM à proximité. Donc afin de réaliser les mesures "rapidement" nous décidons d'utiliser le service SmartLink basé sur un calcul PPP (Precise Point Positioning) en temps réel intégré dans l'antenne GNSS. Une fois allumé, le récepteur GS16 capte les signaux GNSS de toutes les constellations (GPS / GLONASS / Galileo / BeiDou), puis reçoit les corrections (orbites et horloges) envoyées par un satellite géostationnaire (AORE ou

Le fond de la grotte est une immense chambre dont le sol est caractérisé par un impressionnant glacier rocheux avec des signes de mouvement récent en raison de la recharge de glace par le haut. Depuis 2010, la grotte a été étudiée jusqu'à une profondeur de 285 m. Après cette expédition, la grotte était encore inaccessible en raison de l'accumulation de neige au cours des quatre années suivantes, jusqu'à ce qu'un passage fut trouvé l'été 2015. La dimension et la morphologie particulière des dépôts de glace de la grotte ainsi que son altitude ont conduit à la création d'un projet de recherche à long terme pour surveiller les mouvements et les changements de volume de la glace ainsi que pour comprendre le microclimat de la grotte et explorer le potentiel pour de futures études paléoclimatiques. Deux expéditions, en 2015 et 2016, ont été organisées principalement pour acquérir des données scientifiques, installer des pièges à pollen, enregistrer l'humidité et la température en différents points de la grotte et finalement réaliser un relevé 3D de toute la grotte.

Levé extérieur du gouffre par GNSS avec le Leica GS16 combiné au service "SmartLink" et le levé par drone

Le vendredi 30 septembre 2016 c'est la montée des hommes et du matériel grâce à l'hélicoptère, puis nous dressons le camp de base pour 4 jours en autonomie complète (figure 2). Nous



Figure 1. Italie : Haut Adige (ou Tyrol du Sud), Dolomites, vallée de Badia.



Figure 2. Le camp de base à proximité du Piz des Conturines, 3064 m.



25E). La solution de positionnement 3D converge au bout de 20 minutes, c'est-à-dire le temps de marcher vers notre premier point à mesurer. Nous obtenons une précision de 5 cm en 3D sur les 3 points en mesurant 5 minutes chacun, sans perdre la liaison avec les satellites (en tenant la canne verticale pendant la marche). Cette série de 3 mesures est réalisée juste avant le coucher du soleil en à peine une heure avec une température de 5°C. Nous devons rapidement revenir au camp de base pour le briefing définissant la stratégie du lendemain.

Relevés extérieur et intérieur du gouffre avec le scanner 3D Leica ScanStation P40

Le suivi de l'évolution des glaces par relevé au scanner laser fut l'un des principaux objectifs des deux expéditions en 2015 et 2016. Le but est de réaliser un relevé 3D complet du gouffre et surtout des zones de glace afin d'obtenir des données détaillées sur le volume et la taille de ces importantes sources paléoclimatiques souterraines des Dolomites. L'objectif de l'expédition 2016 était de relever la partie supérieure de la grotte, de l'entrée jusqu'à environ -140 m afin de se connecter à la mesure réalisée en 2015 (le fond du gouffre) et d'obtenir un modèle 3D complet de la grotte. L'utilisation d'un scanner laser permet l'acquisition rapide de données de haute précision pour étudier des environnements souterrains vastes et complexes, tels que le Cenote Abyss. Le gouffre atteint -285 m. L'instrument utilisé en 2015 était un HDS 7000 (figure 4), un scanner laser à différence de phase équipé d'un compensateur double axe, laser classe 1 avec une portée de 187 m et une résolution de 0.3 mm. Pendant

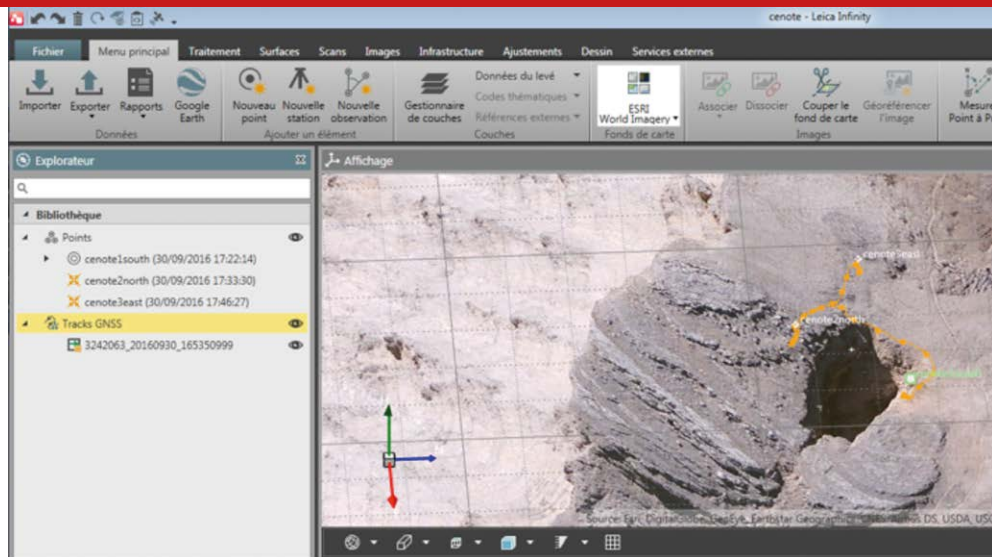


Figure 3. Vue sur le logiciel Leica Infinity : la trace des mesures GNSS autour de l'entrée du gouffre.

les opérations à l'intérieur de la grotte, des cibles circulaires avec une base de support magnétisée tournant sur 360° ont été utilisées. La chambre géante au fond a été mesurée en utilisant 11 scans à une résolution de 12 mm.

En 2016, le relevé s'est poursuivi dans la partie supérieure du puits (au-dessus de la langue et à travers la série de puits courts et de tunnels creusés entre la roche et la glace jusqu'à l'entrée de la doline). En 2016, nous avons utilisé un scanner laser 3D P40 équipé de la technologie WFD (Waveform Digitizing) avec une vitesse de 1 million de points par seconde à une portée de 0,4 à 270 m. Le P40 numérise à 360° l'ensemble de ce qui est visible en 3 minutes (figure 5), sans photo car le gouffre est trop sombre.



Figure 4. Relevé du fond du gouffre en 2015 avec le Leica HDS7000

Tout d'abord, les spéléologues doivent équiper la cavité de cordes fixes afin de permettre la descente dans le gouffre. Le scanner laser 3D P40 est transporté à dos d'homme.

Nous commençons par scanner la partie extérieure du gouffre ainsi que l'entrée pour pouvoir assembler ce relevé avec le nuage de points par drone. Le relevé au scanner laser se fait avec des cibles en extérieur et sans cibles en intérieur. Le relevé de l'entrée ne pose pas de difficulté, par contre dès qu'il faut descendre sur corde fixe et trouver des positions pour le mini-trépied tout se complique. Il faut donc trouver une position stable et mettre en place le trépied, puis placer le scanner laser. C'est très exposé et je fais des positions de scan assez périlleuses. Une fois terminé, il faut ranger le scanner dans le sac à dos et continuer à descendre dans le gouffre. Il faut s'assurer d'un minimum de 30 % de recouvrement entre les scans pour assurer l'assemblage a posteriori. Nous mesurons 20 positions de scanner et il nous aura fallu plus de 8 heures pour

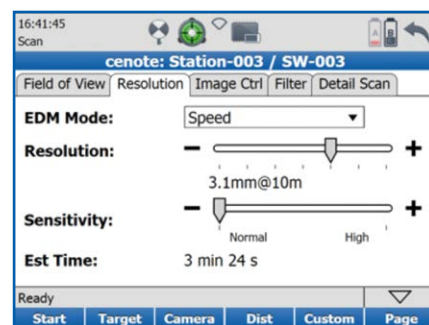


Figure 5. Ecran du laser scanner Leica Scanstation P40 : résolution utilisée de 3.1 mm à 10 m



Figure 6. Dernière position de scan sur la langue de glace verticale, au-dessus de la grande chambre du gouffre.

arriver juste avant la langue glaciaire qui descend verticalement et qui se tient suspendue dans le vide.

Avant de remonter, nous vidons les données sur ma tablette PC Leica CS35 par wifi, car nous laissons le scanner ici et il ne restera plus qu'à mesurer cette langue de glace, ça ne sera pas une partie de plaisir...

Il est 21 h 35 quand on quitte le fond du gouffre avec Francesco et il nous faut encore remonter sur corde fixe toute la moitié du gouffre. Étant novice en spéléologie la remontée est pénible et malgré la fatigue je m'adapte rapidement. C'est une sacrée impression de ne plus avoir la notion du temps dans le gouffre, le temps est suspendu. Nous arrivons au camp de base à 23 h 30.

Durant la journée du 2 octobre il sera impossible d'entrer dans le gouffre, car il a plu et beaucoup d'eau y circule. Ça sera repos et exploitation des données scannées la veille.

Grâce à la neige et au froid, la journée du 3 octobre 2016 permet le gel de l'eau ruisselante, donnant ainsi de bonnes conditions pour la descente dans le gouffre.

Les équipes se mettent en route à 9 h 00, il faut remonter en 20 mn au gouffre et refaire toute la descente qui prendra 1 h pour retrouver le scanner laissé l'avant-veille. C'est reparti pour continuer les relevés au scanner laser avec Tommaso. Vers 14 h 20 nous arrivons à la dernière position de scan (*figure 6*), la plus périlleuse ! Nous sommes suspendus à une corde, en dessous il y a 160 m de

vide, et il nous faut trouver une position où stationner le trépied, c'est-à-dire entre la langue de glace verticale et le rocher... En fixant une broche à glace pour supporter un pied du trépied, j'arrive à trouver une position stable. Il faut installer le scanner et grâce à la portée du scanner P40, nous pouvons mesurer les points du fond du gouffre qui sont à 160 m sous le trépied. La paroi étant concave, nous ne pouvons pas mesurer de points sur 40 m de hauteur de paroi, mais comme nous pouvons mesurer des points au fond, cela donnera assez de points communs avec le nuage de points de 2015. En 2015 le scanner utilisé n'avait pas assez de portée pour atteindre le fond (la chambre au fond mesure 130 m de long et environ 40 m de large). Depuis cette position, cette mesure-ci permettra d'assembler les nuages de points de la mission de 2015 avec ceux de 2016. Il nous faut rester en place pour que le photographe et le journaliste de GEO magazine immortalisent la scène. Nous restons là suspendus 1 h 30 environ, nous sommes gelés car la corde nous coupe la circulation du sang. À 16 h 00 il faut bouger ses membres, faire circuler le sang et remonter la langue de glace et l'ensemble du gouffre (en 1 h 30). À la sortie, parmi de superbes couleurs et le paysage magique des Dolomites, je croise le journaliste qui me dit "you made it" ! Oui nous l'avons fait. Nous avons mesuré en tout 38 nuages de points bien résolus et indépendants qu'il nous faut à présent assembler pour compléter la mission de 2015.

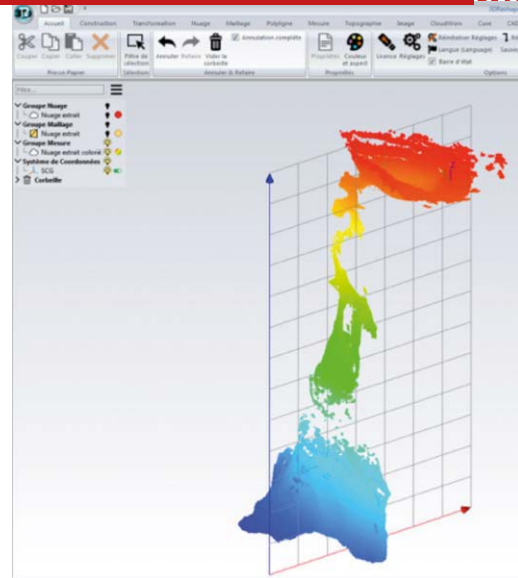


Figure 7. Nuage de points complet dans le logiciel 3D Reshapper

Traitements des nuages de points dans le logiciel Leica Cyclone et 3DR (assemblage, maillage, animation et mesures)

Cyclone a été utilisé pour assembler les nuages de points et fournir un nuage complet, dense et peu bruité. Il faut assembler les 38 positions de scan, le tout sans cible, uniquement basé sur l'assemblage "nuage/nuage"; les algorithmes de Cyclone ont permis d'assembler 80 % des scans automatiquement et le reste a été traité en assemblage "visuel", c'est-à-dire que l'on déplace un scan vers un autre visuellement, et ensuite Cyclone assemble selon un nombre d'itération décidé en amont. Une fois le tout assemblé (*figure 7*), nous avons pu nettoyer le nuage de points afin de le préparer pour le traitement suivant.

3D Reshapper a permis de réaliser un maillage complexe. Ce maillage pourra être comparé facilement avec de prochaines mesures. Il permet aussi de coloriser le nuage selon l'axe Z et de réaliser des vidéos de visite virtuelle. Pour les données drone, nous avons traité les 58 photos en photogrammétrie avec le logiciel PhotoScan (*figure 8*). Nous avons obtenu une qualité de 3 cm par pixel en XY, et 5 cm par pixel en Z.

Conclusions

Les expéditions de 2015 et 2016 sont les premiers pas d'un projet à long terme de surveillance qui pourrait fournir des

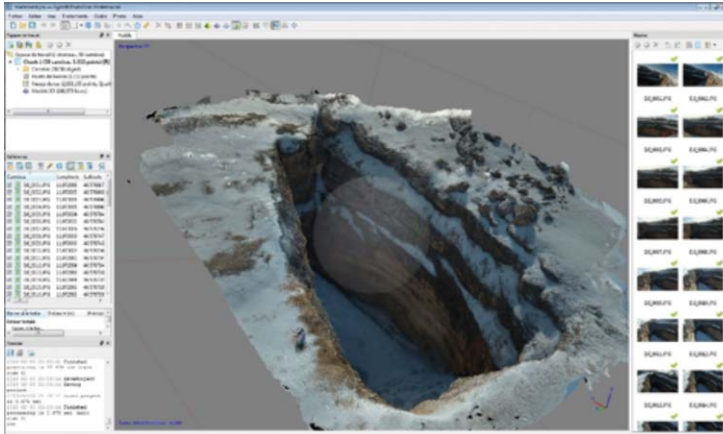


Figure 8. Traitement photogrammétrique des 58 photos dans le logiciel Photoscan



Figure 9. Coupe du gouffre. Montage réalisé par le magazine GEO.

données intéressantes sur les conditions passées des masses de glace de la grotte et de leur évolution en réponse au changement climatique. Dans cette première phase du projet l'objectif principal était de réaliser un relevé 3D haute définition, afin de figer les conditions volumétriques et morphologiques du dépôt de glace à l'intérieur de la grotte, couplés à une surveillance continue du microclimat de la grotte. En outre, les données sur le pollen pourraient ouvrir la perspective de l'étude des couches de glace comme archives paléoclimatiques.

Les activités de recherche dans cette grotte reposent sur la capacité de pouvoir entrer dans la grotte à la fin de l'été ou en automne, et les conditions météorologiques. Néanmoins, une nouvelle expédition est prévue pour 2018 ou 2019 afin de répéter les mesures au scanner laser 3D et comparer les pertes de volume de glace, en corrélation avec les conditions climatiques enregistrées à la surface. ●

Contacts

Farouk KADED - Chef de Produits / Responsable de l'assistance Technique
Leica Geosystems France, Paris
Farouk.kadedd@leica-geosystems.fr

Tommaso SANTAGATA
La Venta "association d'exploration géographique", Trévise, Italie
Co-fondateur de VIGEA - Virtual Geographic Agency
tommaso@vigea.it

Bibliographie

Marchetto GC. (2007) "Les recherches spéléologiques dans le Parc naturel de Fanes-Sennes-Braies et Dolomiti d'Ampezzo (Italie)". Dans : Untertage Alpine 2007, Ramsau bei Berchtesgaden, 9-11 novembre 2007.
Sauro U., Meneghel M., Bini A., Mietto P., Siorpaes C. (1995) *Altopiani Ampezzani*. Geologia geomorfologia speleologia.

ABSTRACT

The abyss of Conturines, also known as Cenote Abyss, represents one of the deepest and largest caves of the Dolomites. This 280 m deep cave is characterized by a huge ice deposit, which makes it of major interest for the study of paleoclimate and modern climate change in this region of the Alps. The cave was discovered in 1994 after the abrupt emptying of a lake at 2940 m. In 2015, a research project began to monitor the long-term movements and volume changes of this ice deposit and to understand the microclimate of the cave. With two expeditions organized in October 2015 and September 2016, a complete study of the cave was carried out using a 3D laser scanner HDS7000 in 2015 and a scanner ScanStation P40 in 2016. Installation of barometric dataloggers, temperature and humidity in different areas of the cave provide a one-year record of the microclimate. In addition, pollen traps have been installed to study the current flow of pollen on and inside the cave, while preliminary analyzes of pollen grains held in the ice are in progress. The Cenote Abyss Ice Caves Research Project aims to shed light on the changing climate of the Dolomites over the past several hundred years, perhaps thousands of years, as well as on environmental changes more recent events that led to the melting of the cave glacier.



Figure 10. L'équipe au camp de base.

La forme de la Terre dans l'Histoire occidentale

■ Xavier DELLA CHIESA

La connaissance de la forme de la Terre a débuté en Occident il y a 2 500 ans. Elle a depuis été mesurée, corrigée et précisée. L'histoire de notre vision du monde est riche en intuitions géniales, en raisonnements brillants... autant qu'en erreurs magistrales et en légendes diverses qui donnent encore aujourd'hui lieu à de résistantes idées reçues. Afin de corriger quelques convictions parfois (trop) bien ancrées, faisons l'état des lieux de ce que nous connaissons de cette Histoire.

MOTS-CLÉS

Parménide, Ératosthène, Hipparque, Posidonius, Ptolémée, Shen Kuo, Al Idrissi, Pierre d'Ailly, Mercator, Isaac Newton, Picard, Delambre et Méchain, Alfred Wegener, ellipsoïde, géoïde, gravimétrie



Figure 1

Précision de vocabulaire

La forme de la Terre est une question de géodésie – la science qui étudie la forme et les dimensions de notre monde. Et, pour les géodésiens, cette forme est celle qu'il aurait dans l'espace si sa surface était en tout point à l'altitude 0 : elle ne présenterait aucune pente et serait donc, pour ainsi dire, horizontale. C'est de cette forme horizontale dont il va être question.

L'histoire de notre connaissance

■ La préhistoire

Au commencement, l'Homme croyait très naturellement que la Terre était plate : l'horizon marin est plat et, sans les reliefs, on ne monterait, ni ne descendrait jamais. La Terre plate est donc l'idée qui s'impose sans que l'on imagine qu'il y ait lieu de s'interroger à ce sujet.

■ L'Antiquité classique (600 av. J.-C.-100)

Il est difficile de déterminer avec certitude qui est le premier à supposer que la réalité pouvait être différente. Peut-être Thalès (vers 600 av. J.-C.), mais il est sûr qu'Anaximandre, son successeur à l'école de Milet, imagine que nous vivons sur la section plane supérieure d'un cylindre qui flotte dans l'espace car "il n'a nulle part où tomber". Ensuite, Pythagore (vers 550 av. J.-C.) conçoit un monde sphérique et Parménide (vers

500 av. J.-C.) soutient l'hypothèse par des arguments rationnels. Mais comment a-t-il raisonnablement pu défendre une idée aussi contre-intuitive ?

Installé à Elée, en Italie, il constate d'abord que, lorsque l'on navigue de chez lui vers le Sud, les sommets des monts Nébrodes apparaissent sur l'horizon avant la plage de Sicile (Figure 1). Une seule explication, très simple, à ce phénomène : une courbure de la Terre dans le sens Nord-Sud.

Fort de cette observation, certes facile, Parménide réalise une autre déduction

bien moins évidente. Lorsque le Soleil se couche là où, plus tard, s'élèvera la ville de Naples, on le voit descendre dans le ciel et disparaître sous l'horizon ; mais on constate en se retournant que le Mont Somma (actuellement le Vésuve) est en revanche encore éclairé et disparaît dans l'ombre, depuis la base vers le sommet, en approximativement quatre minutes. Or, dans un schéma de Terre plate, la limite de l'ombre est nécessairement la projection du bord du monde et la trigonométrie offre la possibilité d'en calculer la distance ; à

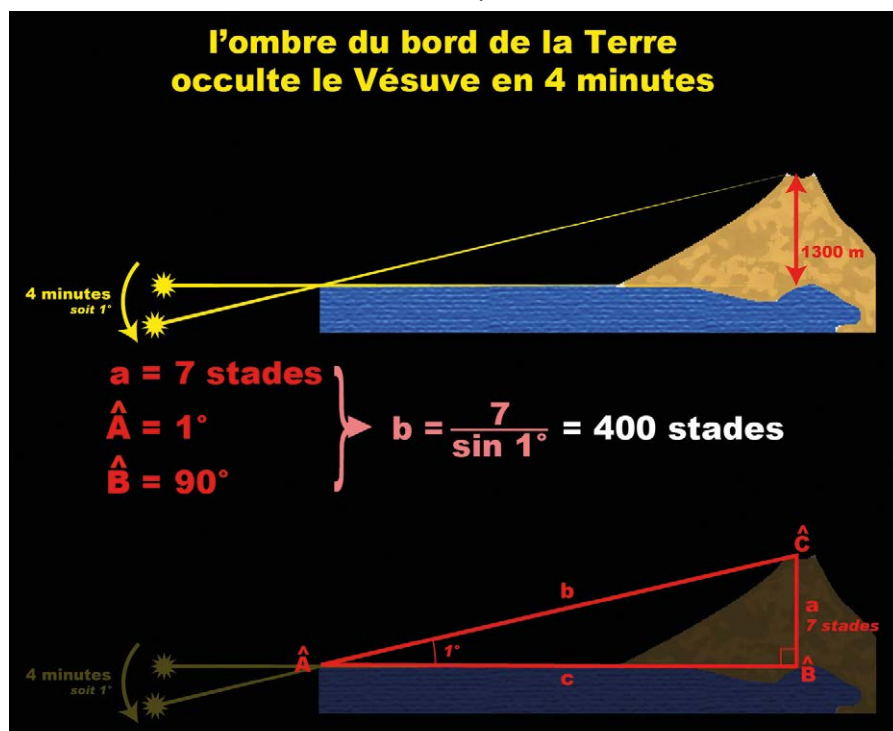


Figure 2



condition toutefois de connaître l'altitude du Mont Somma. Fort heureusement, l'application du théorème de Thalès fait des miracles en la matière. Parménide découvre ainsi que le bord de la Terre devrait se situer à environ 75 kilomètres à l'Ouest (Figure 2). Dès lors, la Corse plonge dans le vide sidéral, tout comme la Gaule, la péninsule ibérique et l'océan qui se trouve au-delà – et dont, d'ailleurs, on ne distingue toujours pas la fin. Bref, l'incohérence du résultat réfute l'hypothèse du calcul : la Terre n'est pas plate d'Est en Ouest et présente donc également une courbure dans ce sens. Or la figure géométrique la plus simple qui présente deux courbures perpendiculaires est la sphère. Nul doute pour Parménide que ce doit être la réalité. En outre, il en propose une modélisation climatique complète (voir encadré : la théorie des cinq climats de Parménide). Mais admettons-le : l'intuition de Parménide ne rencontre pas beaucoup d'adhésion. Toutefois, quelques décennies plus tard, l'un de ses élèves se range aux arguments de son maître et convainc l'ensemble du monde grec : Socrate (470–399 av. J.-C.).

La théorie des cinq climats de Parménide

En prolongeant la courbe de la température moyenne en Europe jusqu'aux latitudes extrêmes, Parménide déduit un climat glacial aux pôles et une zone torride au niveau de l'Équateur. Ainsi, la Terre ne pourrait être habitable qu'aux latitudes moyennes des deux hémisphères. Au II^e siècle av. J.-C., Cratès de Mallos envisage l'existence d'un continent miroir du nôtre dans l'hémisphère sud. Mais la torride zone équatoriale étant considérée infranchissable, il admet que la théorie restera sans doute hors de portée d'une vérification expérimentale (Figure 3).

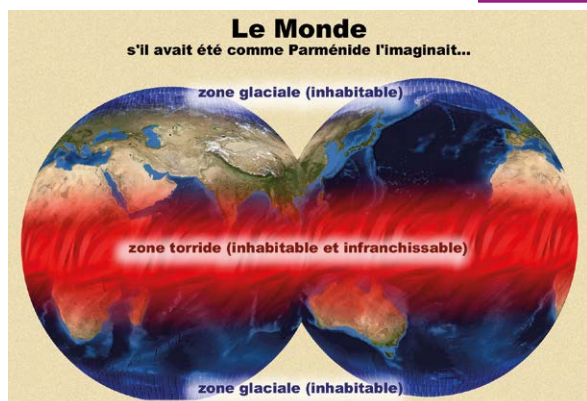


Figure 3

Mais les savants les plus réactifs ne tardent pas à poser la question subsidiaire évidente : la Terre étant sphérique, quelle est sa circonférence ?

Le premier à en donner une estimation est Eudoxe (408–355 av. J.-C.), qui l'évalue à 400 000 stades – soit 74 000 kilomètres¹, presque le double de la réalité. Il est difficile de savoir comment il a obtenu ce résultat, car le détail de ses travaux a été perdu, mais il est probable qu'il ait mesuré la hauteur d'une étoile en différents endroits d'un même méridien. Le phénomène de réfraction atmosphérique, encore inconnu à son époque, a pu fausser ses observations et le conduire à cette nette surestimation. Quoi qu'il en soit, étant la seule valeur disponible pendant quelques décennies, elle est reprise par les savants suivants et, notamment, par celui dont la Science va dépendre pendant plusieurs siècles : Aristote (384–322 av. J.-C.).

Le premier calcul encore aujourd'hui documenté des dimensions de la Terre est l'œuvre d'Ératosthène (276–194 av. J.-C.). Il détermine une

1 La conversion est ici réalisée à partir d'une valeur moyenne (185 m) de la longueur des différents stades utilisés à l'époque, entre celui de Delphes (177,50 m) et celui d'Olympie (192,25 m).

circonférence terrestre de 252 000 stades, soit environ 42 000 kilomètres² (voir encadré : l'illumination d'Ératosthène) : une excellente précision pour les moyens de l'époque. Mais il ne s'agit là que d'un bienheureux hasard, car il a réalisé plusieurs approximations qui, par chance, se sont compensées entre elles. Mais ni lui ni personne ne pouvait être sûr de la fiabilité de son calcul, qui donne rapidement lieu à critique et conduira à une nouvelle mesure du monde...

Toutefois, peu de temps après Ératosthène, Hipparque (190–120 av. J.-C.) fait sensiblement progresser les conditions scientifiques de notre connaissance de la forme de la Terre. Comme il est impossible de représenter une sphère sur un plan sans induire de déformations, Hipparque étudie les projections de base : coniques, cylindriques et azimutales. Il formalise une idée d'Ératosthène, qui avait représenté le monde en se servant de lignes remarquables Est–Ouest et Nord–Sud, et invente ainsi le système de coordonnées à base de parallèles et de méridiens qui

2 La conversion est ici réalisée en attribuant au stade utilisé par Ératosthène une longueur de 166,67 mètres, en se basant sur la longueur du stade égyptien attestée par Strabon.

L'illumination d'Ératosthène (Figure 4)

En visite à Syène (Assouan), Ératosthène est ébloui par le reflet du soleil au fond d'un puits. Effectivement : à midi au solstice d'été, le soleil est au zénith au Tropique du Cancer, sur lequel Assouan est situé. Il remarque en outre que le Soleil n'est jamais au zénith à Alexandrie. On a déjà compris que, le Soleil étant très loin de la Terre, ses rayons peuvent être considérés comme parallèles. S'il n'est jamais à la verticale d'Alexandrie, ce ne peut donc être que l'effet de la courbure de la Terre. En mesurant la longueur de l'ombre d'un gnomon le jour du solstice d'été à Alexandrie, il déduit l'angle qui la sépare d'Assouan par la règle des angles alternes-internes. Il mesure ensuite la distance entre les deux villes pour ensuite la convertir sur 360° et obtenir la circonférence polaire de la Terre. Ensuite, les récits divergent : parfois on dit qu'il a mesuré la distance en pas de chameau ou qu'il a utilisé ceux d'une armée. Mais il l'a probablement calculée grâce à des plans cadastraux, le Cadastre ayant justement été inventé sur les rives du Nil à cette époque.

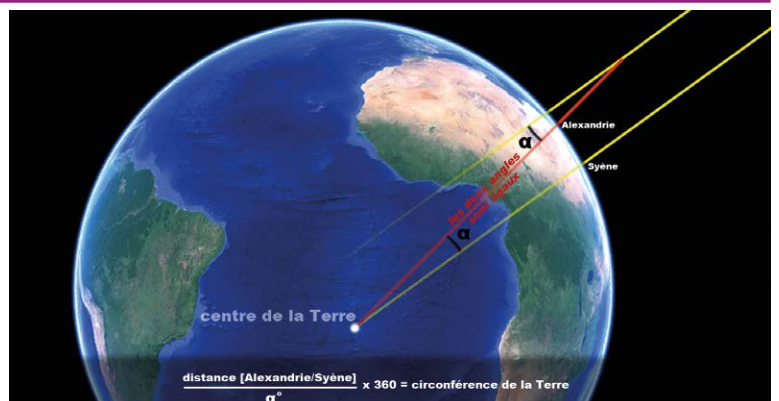


Figure 4



est encore utilisé de nos jours. Par une méthode basée sur les comparaisons des éclipses lunaires et solaires et inventée par Aristarque de Samos (310–230 av. J.-C.), il calcule la distance de la Terre à la Lune en commettant une erreur de moins de 10 %.

Pendant ce temps, la mesure d'Ératosthène continue à faire débat. Posidonius (135–51 av. J.-C.) reprend le calcul de la circonférence selon une méthode plus rigoureuse. Il mesure la hauteur de la très brillante étoile Canopus à Rhodes et à Alexandrie. Il intègre la réfraction atmosphérique dans ses mesures, évalue à 5 000 stades la distance entre les deux villes et tient compte de leur décalage sur le méridien. Ses travaux confirment ceux d'Ératosthène.

■ L'Antiquité tardive (100–476)

Deux siècles plus tard, l'école d'Alexandrie rédige un grand ouvrage de Géographie, qu'ils appellent du nom du géant de la mythologie grecque : Atlas. Marin de Tyr (70–130), l'un de ses premiers rédacteurs, approuve le calcul de Posidonius mais prend une décision lourde de conséquences : il réduit la distance entre Rhodes et Alexandrie à 3 750 stades. Peut-être a-t-il juste changé d'unité de mesure car, à son époque, les stades se comptaient par dizaines : 3 750 de ses stades pouvaient correspondre à 5 000 stades de Posidonius. Mais l'Histoire retiendra que Marin de Tyr a corrigé ce qui devait être une surestimation. Dès lors, la circonférence du globe est

Pendant ce temps... à Pékin

Trois théories de la forme de la Terre se succèdent durant l'antiquité chinoise. D'abord celle de la canopée (300 av. J.-C.), qui présente ciel et terre sous forme d'arches. Puis ZHANG Heng (78–139) se représente le ciel comme un œuf dont la Terre serait le jaune. Enfin, la théorie Xuan Ye, d'origine obscure, propose un espace sans limite où flottent les corps célestes. YI Xing (683–727) semble être le premier à réaliser une mesure de la circonférence terrestre en Chine, qu'il estime à environ 47 630 km. En perfectionnant un appareil inventé dès le III^e siècle, SHEN Kuo (1031–1095) met au point le compas à aiguille magnétique, qui deviendra la boussole. Il met en évidence la précession des équinoxes et découvre la formation des terrains par sédimentation marine.

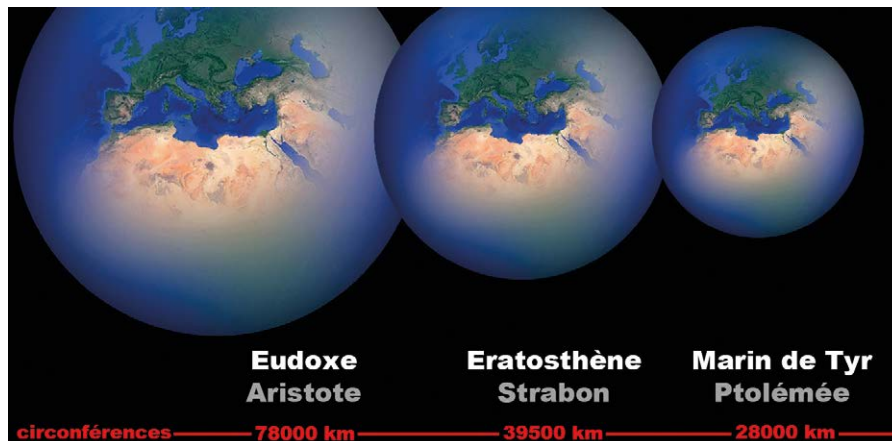


Figure 5

La double erreur de Ptolémée

Ptolémée étend sa cartographie jusqu'à l'Extrême-Orient. N'y étant pas allé en personne, il sous-estime les difficultés de la route empruntée par les voyageurs dont il recueille les témoignages, ce qui le conduit à évaluer la distance du Japon à environ 14 000 kilomètres, au lieu des 10 000 réels. Or, en traçant un continent plus étendu qu'il n'est sur la sphère trop petite de Marin de Tyr, la distance par la mer entre les extrémités du continent diminue fortement. Cette double erreur aura une conséquence très inattendue 1400 ans plus tard...

réduite à 28 000 kilomètres (Figures 5 et 6). Quelques années plus tard Claude Ptolémée (90–168) achève l'atlas et sera pendant longtemps considéré comme le maître de la géographie, en dépit de ses imprécisions (voir encadré : la double erreur de Ptolémée) qui resteront méconnues pendant plusieurs siècles.

■ Le Haut Moyen Âge (476–987)

Avec le déclin de la civilisation grecque, la recherche fondamentale tombe en désuétude, la culture romaine étant davantage tournée vers l'expérimentation pratique. Puis, la chute de l'empire d'Occident (476) met un terme à l'administration à grande échelle de Rome et les Européens se réorganisent autour d'économies locales. Les voyages cessent et, dès lors, la cartographie scientifique est abandonnée, faute d'utilité.

Si les recherches sur les dimensions de la Terre vont rester au point mort pendant plus de mille ans, le Moyen Âge ne va pas pour autant oublier l'héritage grec. Contrairement à une idée reçue depuis trop longtemps, la connaissance de la sphéricité de la Terre ne s'est pas perdue



Figure 6

au cours de cette période (voir encadré : la Terre n'était pas plate au Moyen Âge). Si l'Atlas de Ptolémée disparaît des bibliothèques occidentales pour ne faire son retour qu'à la fin du XIV^e siècle, il reste en revanche trace des travaux d'Alexandrie et, plus encore, du Timée de Platon et des écrits d'Aristote.

■ Le Moyen Âge classique (987–1272)

Dès le XI^e siècle, Aristote devient la principale référence scientifique. Dans son Traité du Ciel, il affirme la sphéricité de la Terre – ainsi que le géocentrisme, qui restera pendant longtemps la seule représentation acceptée du système solaire.

À la même époque, la féodalité se stabilise dans les royaumes francs. Les chevaliers répondent alors en masse à l'appel des croisades, qui sont à l'origine de la reprise de la cartographie scientifique en Occident. Car, s'il reste possible de naviguer jusqu'en Terre Sainte en longeant les côtes bien connues de la Méditerranée, les contacts directs avec l'empire arabe ont une conséquence inattendue : parmi les richesses que les croisés rapportent avec eux figurent des épices d'Extrême-Orient. Relevant une cuisine locale plutôt fade, elles

Pendant ce temps... à Bagdad

Par son histoire et sa proximité à la Méditerranée, l'empire arabe bénéficie des découvertes grecques et acquiert ainsi la connaissance de la sphéricité de la Terre dès son origine. Le calife Al-Mamûn (786-833) propose une vérification des travaux d'Ératosthène mais les premiers calculs réalisés restent approximatifs, accusant des erreurs d'entre -20 et +10 %. Al-Khwarizmi (780-850) donne la meilleure estimation arabe de l'époque, de 44 064 km. Déjà très en avance sur son temps, l'astronomie arabe progresse avec Ibn Yunus (950-1009), qui estime avec une bonne précision diverses constantes fondamentales, dont l'angle de l'écliptique et la période de précession des équinoxes. Le planisphère d'Al-Idrissi (1100-1165) succède à celui de Ptolémée et innove en développant la théorie des climats (*voir encadré : la théorie des cinq climats*) et en portant des informations de géographie humaine.

connaissent un succès retentissant dans les cours d'Europe et deviennent un signe de richesse dont les monarques ne peuvent bientôt plus se passer. Un commerce débute alors avec l'empire arabe. La rapidité et l'optimisation des voyages deviennent des atouts majeurs qui conduisent les Occidentaux à exhumer les travaux cartographiques. Des cartes marines d'un nouveau genre sont établies grâce à la boussole nouvellement arrivée de Chine par l'intermédiaire des vikings : les portulans. Avec la boussole, les navires suivent des routes à cap constant et les temps de trajet de port à port se traduisent en distances. Les approximations de la méthode sont progressivement moyennées avec les répétitions des voyages. Au XIII^e siècle, les portulans présentent une excellente précision cartographique (*Figure 7*).

■ **Le Bas Moyen Âge (1272-1453)**

Les cartes terrestres restent en revanche en leur état antique et ne s'enrichissent que de rares nouveautés. L'évolution la plus significative se produit au début du XIV^e siècle, lorsque Marco Polo (1254-1324) revient de son voyage de prospection commerciale en Extrême-Orient (*Figure 8*).

Mais la question des dimensions de la Terre n'est pas encore reprise lorsque l'âge d'or médiéval, parfois appelé la Renaissance du XII^e, est stoppé par la

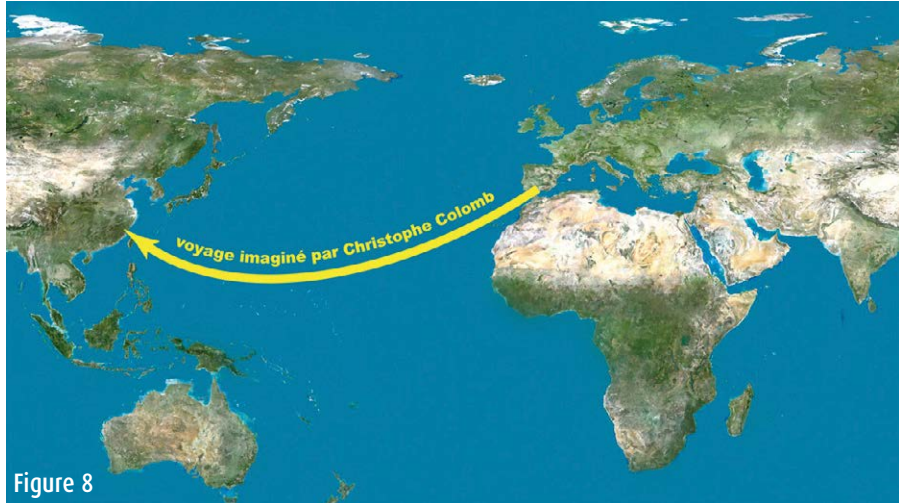


Figure 8

La Terre n'était pas plate au Moyen Âge

Divers documents du Moyen Âge attestent la connaissance de la sphéricité : Au IV^e siècle, Lactance tente d'imposer l'idée d'une Terre plate afin de faire table rase du passé paganiste. Il se moque de ceux qui pensent que la Terre est ronde, c'est-à-dire tous les gens instruits – lui excepté. De la même manière, dans sa *Topographie Chrétienne*, Cosmas Indicopleustès, un géographe improvisé du VI^e siècle qui s'oppose avec virulence au christianisme officiel, déplore que nombre de savants font encore confiance aux idées antiques. Il propose également une carte d'un monde plat. Toutefois, dans son commentaire sur l'œuvre de Cosmas, l'archevêque Photius de Constantinople (IX^e siècle) la qualifiera d'"inepties" et d'"absurdités". Au XII^e siècle, les enluminures d'Hildegarde de Binden révèlent une Terre sphérique. Au XIII^e, le principal ouvrage d'astronomie du Moyen Âge *De Sphaera Mundi* de Jean de Halifax est largement inspiré des écrits de Ptolémée. Enfin, l'*Imago Mundi* du cardinal Pierre d'Ailly (1410) cite Jean de Halifax et Ptolémée.

Guerre de Cent Ans. A la fin du XIII^e siècle, seul le Sud de l'Europe continue à entretenir des échanges avec l'Orient.

■ **La Renaissance (1453-1633)**

Les intérêts des pays méridionaux sont toutefois divergents car, si le commerce par la Méditerranée fait les affaires des Vénitiens et des Génois qui s'imposent vite comme seuls intermédiaires européens, il est nettement moins avantageux pour les deux pays de la péninsule ibérique : en bord de carte, ils paient les épices au prix fort et, dès le XV^e siècle, le roi Henri

le Navigateur lance le Portugal à la recherche d'une route directe vers les richesses d'Extrême-Orient. Les explorateurs se succèdent toujours plus au Sud le long des côtes africaines. En 1441, la découverte de la verdoyante Guinée par Nino Tristaõ balaie la théorie des cinq climats que Ptolémée avait relayée dans son atlas.

Les expéditions portugaises barrent le passage aux initiatives de l'Espagne dont la situation économique menace dès lors de devenir critique, entraînant à brève échéance la fin de sa domination

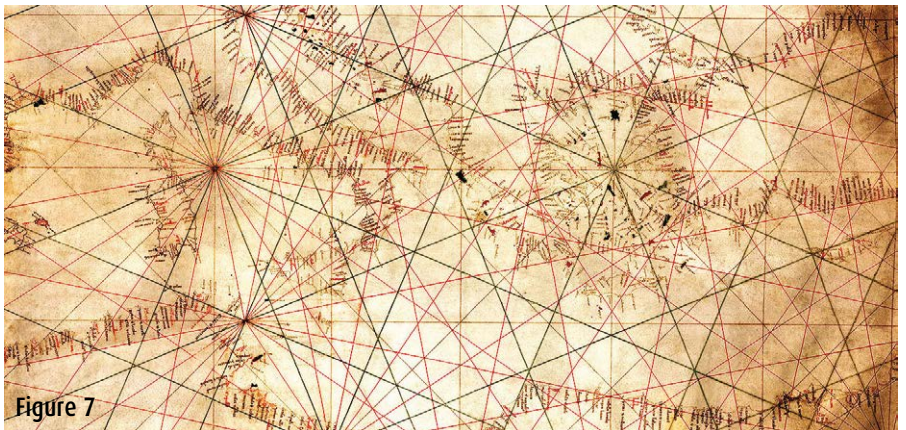
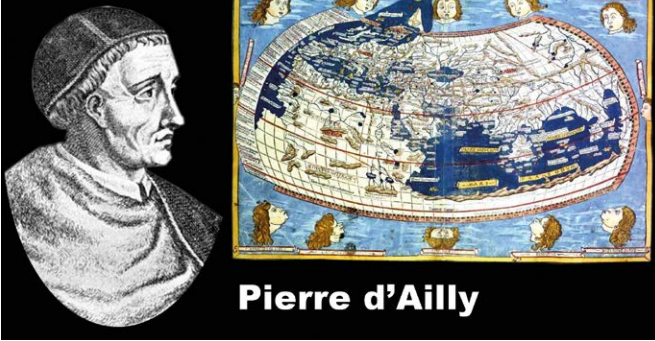


Figure 7

Figure 9



Pierre d'Ailly

en Europe. Mais, à la fin du XV^e siècle, un Génois se met au service d'Isabelle de Castille pour tenter de devancer le Portugal en rejoignant l'Extrême-Orient par l'Ouest. Il a une absolue confiance en la mesure de Marin de Tyr, rapportée en dernier lieu par Pierre d'Ailly (voir encadré : *la Terre n'était pas plate au Moyen Âge et figure 9*). Par ailleurs, selon l'étendue du continent eurasiatique de Ptolémée, il estime les Indes à une distance de 1 780 lieues marines, soit au plus deux mois de navigation. Mais la reine d'Espagne reste dubitative, car les découvertes portugaises ont jeté le doute sur l'ensemble des travaux d'Alexandrie. Il n'est pas simple pour un bateau de tenir la mer sans escale pendant deux mois ; et si le globe devait se révéler presque trois fois plus vaste, comme Aristote l'a écrit, l'expédition serait à coup sûr vouée à l'échec. Mais le comptable de la reine calcule ce que

Le destin inattendu d'Amerigo Vespucci

Marchand au service de Lorenzo de Médicis, Amerigo Vespucci embarque pour les terres découvertes à l'Ouest afin d'en prospecter les possibilités commerciales. Le rapport qu'il envoie à son commanditaire après son second voyage est titré *Mundus Novus* car "c'est la chose absolument nouvelle pour ceux qui en entendent parler". Cette inspiration aussi lumineuse que fortuite lui vaut d'être progressivement hissé au rang de célébrité. Son nom est ensuite abusivement utilisé au point que beaucoup finissent par croire que c'est lui qui a découvert ce nouveau continent. Dans l'école de géographie de Saint-Dié en Lorraine, le cartographe Martin Waldseemüller lui rend hommage en créant un néologisme pour nommer la baie de Rio de Janeiro : America. Ce nom circule, s'amplifie et, quelques années plus tard, s'impose comme celui de l'ensemble du continent.

le succès du voyage ferait économiser à l'Espagne en termes de court-circuitage des intermédiaires. Elle ordonne alors la construction d'une caraque et de deux caravelles, afin d'envoyer le Génois Christophe Colomb à la conquête de l'Ouest.

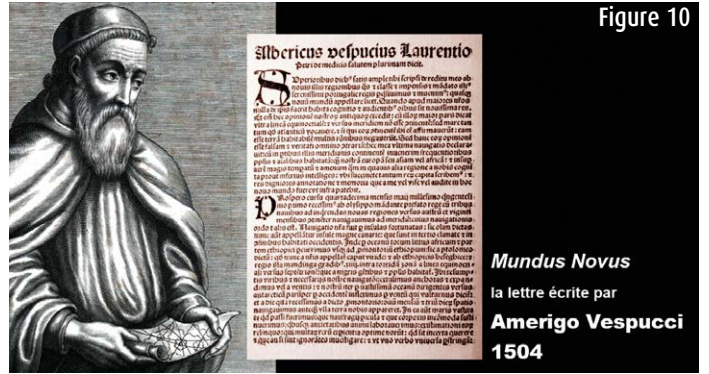
Lorsqu'il aborde une terre le 12 octobre 1492 après cinq semaines de navigation, c'est la promesse d'une rapide fortune pour l'Espagne. Mais ses descriptions ne correspondent en rien à l'Extrême-Orient de Marco Polo et provoquent la confusion parmi les géographes. Il meurt en 1506 sans jamais avoir compris ce qu'il avait découvert et la lumière ne jaillit que l'année suivante (voir encadré : *le destin inattendu d'Amerigo Vespucci et figure 10*) : il existe entre l'Occident et l'Orient un continent dont nul ne soupçonnait l'existence – du moins officiellement. Si la dernière décennie du XV^e siècle avait failli approuver la mesure de la circonférence terrestre de Marin de Tyr, le siècle suivant ré-ouvre aussitôt la question. Toutefois, l'Amérique barre la route de l'Ouest et oblige l'Espagne à la contourner. Un Portugais se met alors à son tour au service de l'Espagne : à la tête de cinq navires, Fernand de Magellan entreprend en 1519 ce qui devient la première circumnavigation terrestre. Ce voyage prouve la sphéricité de la Terre et aboutit à une estimation de sa circonférence proche de celle d'Ératosthène.

■ L'époque moderne (depuis 1633)

La circonférence polaire de la Terre est précisée en 1670 par l'abbé Picard qui, en réalisant des mesures de méridien entre la Picardie et l'Essonne, l'évalue à 20 541 600 toises, soit 40 036 km.

Mais un nouveau rebondissement secoue la forme et les dimensions de

Figure 10



Mundus Novus
la lettre écrite par
Amerigo Vespucci
1504

la Terre au XVIII^e siècle. En étudiant des mesures effectuées au sud de la France, Jacques Cassini (dit Cassini II, 1677–1756) déduit que la Terre n'est pas une sphère parfaite, mais doit être allongée aux pôles à la manière d'un ballon de rugby. Mais cette conclusion contredit certaines autres observations, notamment les oscillations du pendule aux différentes latitudes, qui tendent à prouver le contraire. Une controverse de quinze ans oppose Cassini aux partisans d'Isaac Newton (1643–1727), qui défend l'idée d'une Terre aplatie. Pour trancher la question, la France envoie deux expéditions, en Laponie et au Pérou, dans le but de mesurer très précisément les longueurs d'un degré de méridien dans des conditions de latitudes extrêmes – leur comparaison devant confirmer l'une ou l'autre des théories. Mais la certitude sera acquise par Nicolas-Louis de la Caille (1713–1762) et César-François Cassini de Thury, le fils de Cassini II (dit Cassini III, 1714–1784), avant même les résultats des expéditions. En comparant des mesures réalisées en Provence avec celles du méridien de Paris, ils valident l'hypothèse de Newton en 1744.

Lorsqu'éclate la Révolution Française, on sait que la Terre est un sphéroïde de révolution aplati aux pôles, c'est-à-dire un ellipsoïde dont l'aplatissement est évalué par Pierre-Simon Laplace (1749–1827) entre 1/250 et 1/320^e. Avec l'avènement des idéaux des Lumières émergent des aspirations universelles, car rien n'a vraiment changé depuis l'Antiquité : chaque pays, voire chaque région, a ses propres unités de mesure auxquelles il est nécessaire de s'adapter à chaque passage de frontière. La France décide d'établir un nouveau système, appuyé sur une longueur commune au monde entier : la circonférence polaire

Le procès de Galilée (figure 11)

Contrairement à une confusion courante, Galilée n'a rien découvert de particulier sur la forme et les dimensions de la Terre. Les travaux qui l'ont opposé à l'inquisition portent sur l'héliocentrisme, qui n'était pas accepté au XVII^e siècle car il contredisait le modèle d'Aristote. Si Galilée a été condamné à la prison à perpétuité, le pape Urbain VIII a immédiatement commué sa peine en résidence à vie. Galilée est mort chez lui, près de Florence, à 78 ans (1642).



de la Terre. Dès 1792, le Marquis de Condorcet (1743–1794) demande aux astronomes Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain de mesurer aussi précisément que possible le méridien de Paris entre Dunkerque et Barcelone (figure 12). Une nouvelle unité de mesure est créée en 1799 : le mètre est défini comme le quart du dix millionième du méridien terrestre. Il faut toutefois noter

Forme de la Terre et gravimétrie

Comme précisé en début d'article, la "forme de la Terre" désigne une surface parfaitement horizontale. Mais l'horizontale n'est jamais que la perpendiculaire à la verticale, et la verticale est définie comme la direction du fil à plomb. La loi de la gravité nous apprend que les corps massifs attirent les plus légers. Sur Terre, le fil à plomb est donc avant tout attiré vers le centre de l'énorme masse qu'est la planète elle-même. Mais la Terre n'est pas de composition interne homogène : il existe dans sa croûte et son manteau des masses plus denses que leur environnement immédiat. Elles-mêmes exercent une force de gravitation qui leur est propre et attirent le fil à plomb, qui dévie dès lors de sa direction première. Or, si la verticale est déviée, sa perpendiculaire horizontale l'est également.

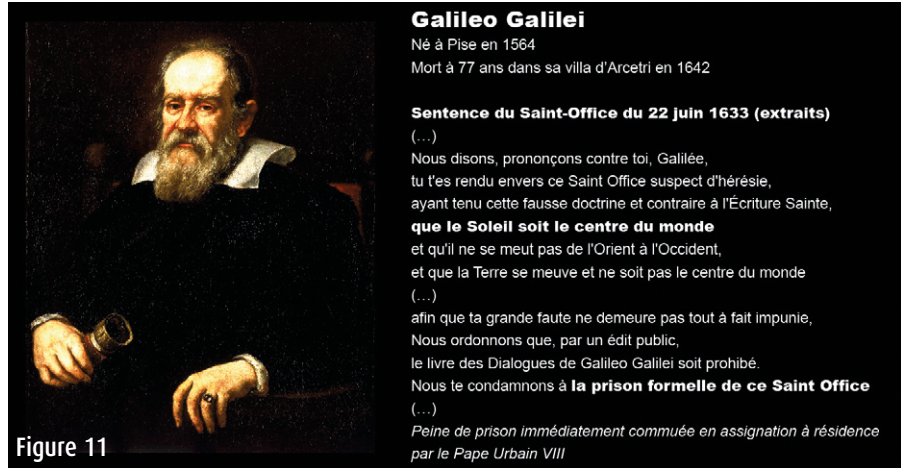


Figure 11

Galileo Galilei

Né à Pise en 1564
Mort à 77 ans dans sa villa d'Arcetri en 1642

Sentence du Saint-Office du 22 Juin 1633 (extraits)

(...)
Nous disons, prononçons contre toi, Galilée, tu t'es rendu envers ce Saint Office suspect d'hérésie, ayant tenu cette fausse doctrine et contraire à l'Écriture Sainte, **que le Soleil soit le centre du monde** et qu'il ne se meut pas de l'Orient à l'Occident, et que la Terre se meuve et ne soit pas le centre du monde (...)
afin que ta grande faute ne demeure pas tout à fait impunie, Nous ordonnons que, par un édit public, le livre des Dialogues de Galileo Galilei soit prohibé. Nous te condamnons à la **prison formelle de ce Saint Office** (...)
Peine de prison immédiatement commuée en assignation à résidence par le Pape Urbain VIII

que cette unité "universelle" reste très française : en réalisant la triangulation de l'Inde, William Lambton (1753–1823) effectue une mesure de méridien qui, si elle avait servi d'étalon, aurait abouti à une unité de mesure légèrement plus courte.

Dès le XIX^e siècle, les géodésiens étudient l'épineux problème de la gravité terrestre, dont l'importance sur la forme de la Terre avait été démontrée en 1743 par Alexis-Claude Clairaut (*voir encadré : forme de la Terre et gravimétrie*). Charles Lallemand (1857–1938) (figure 13) est le premier à en tenir compte pour réaliser le nivellement général de la France qui porte son nom. Toutefois, la difficulté de mesurer la gravité terrestre réelle le conduit à se contenter de la décrire par un modèle mathématique global.

Le XX^e siècle

En 1912, une nouvelle théorie relègue la question de la pesanteur au second plan. Dans *La Genèse des continents et des océans*, le climatologue allemand Alfred Wegener (1880–1930) (figure 13) suppose qu'en des temps très reculés, il n'existait qu'une seule masse

continentale qui se serait fractionnée pour donner naissance aux continents actuels ; lesquels, d'après lui, contiennent à dériver à la surface du globe. Toujours d'après lui, ce mouvement expliquerait la formation des chaînes de montagnes et les tremblements de terre. Pour appuyer sa théorie, il convoque nombre d'observations multidisciplinaires : géographie (la complémentarité des côtes africaine et sud-américaine), paléontologie (les similitudes de fossiles en des endroits éloignés), climatologie (les traces de changements climatiques inexplicables de manière globale), entre autres. S'appuyant sur la théorie orthodoxe selon laquelle le relief s'explique par le refroidissement de la Terre, bien des scientifiques tournent les idées de Wegener en ridicule en lui demandant de désigner la force phénoménale qui pourrait générer un mouvement de masses telles que les continents. Or Wegener ne peut proposer aucune explication satisfaisante à ce sujet. Cette force n'est découverte qu'en 1932 par le géologue anglais Arthur Holmes, quelques mois après la mort de Wegener au Groenland : les



Figure 12

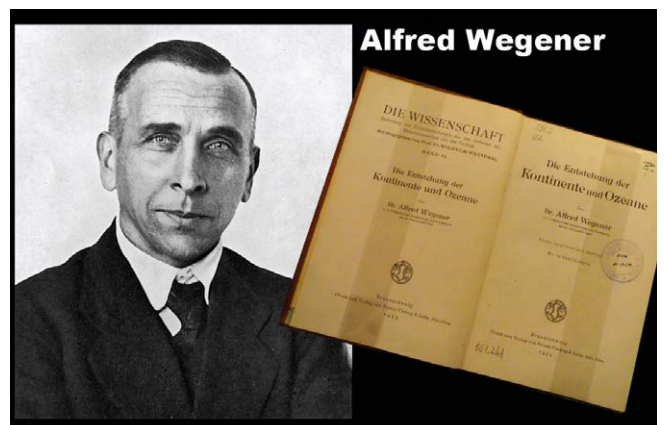


Figure 13



mouvements de convection du manteau terrestre.

Les progrès techniques de l'après-guerre relancent ensuite les questions sur le champ de gravité, laissées en semi-suspens depuis plus de cinquante ans. La trajectoire de Spoutnik, le premier satellite artificiel lancé en 1957 par l'Union Soviétique, donne aux géodésiens une première idée des déformations générales de l'ellipsoïde terrestre. Les satellites suivants enrichissent et précisent les mesures, jusqu'au lancement de la première constellation de positionnement spatial américaine, le système TRANSIT. Ses données vont ouvrir la voie à la modélisation de la forme réelle de la Terre : le géoïde. Déformé comme une patate par les déviations de la verticale dues à l'hétérogénéité des masses internes de la planète (*voir encadré : Forme de la Terre et gravimétrie*), il accuse des écarts géométriques d'environ deux cent mètres d'amplitude par rapport à l'ellipsoïde parfait.

Toutefois, comme il est impossible de tracer un système de coordonnées sur un volume irrégulier, les géographes ont choisi d'assimiler la planète à un véritable ellipsoïde, afin de transcrire les informations de longitude et de latitude. Calculé en 1980, l'ellipsoïde IAG-GRS80 moyenne au mieux les déformations du géoïde (*figure 14*). Utilisé dès le départ comme la référence terrestre du système GPS, il est aujourd'hui intégré dans le référentiel géodésique international ITRS.



Figure 14

Épilogue

Les connaissances acquises à la fin du siècle dernier autorisent à affirmer que la forme et les dimensions de la Terre ont enfin livré tous leurs secrets. Mais les déformations du globe promettent aux géodésiens d'être encore loin, très loin du bout de leurs peines en matière de système de coordonnées mondial : les utilisateurs des systèmes GNSS (positionnement par satellites) ne cessent de demander une précision toujours plus drastique pour des applications de plus en plus exigeantes. L'ordre de grandeur de la précision actuellement recherchée est le millimètre. Mais se positionner au millimètre près sur une patate en perpétuelle déformation aléatoire n'est pas une tâche facile... ●

Contact

Xavier DELLA CHIESA
xavier.della-chiesa@ign.fr

Bibliographie

Le Timée par Platon, éditions Flammarion (2017) - ISBN 2-081421-56-9
Pour l'histoire de la science hellène par Paul Tannery, Revue Philosophique de Louvain (1932) (disponible sur Wikisource)
La Genèse des continents et des océans par Alfred Wegener, éditions Bourgeois (1991) - ISBN 2-267008-01-7
Histoire de la cartographie par Georges Alhinac (1986)

Mesurer la Terre par Jean-Jacques Levallois, éditions AFT (1988) - ISBN 2-907586-00-9

Les Sciences géographiques dans l'Antiquité par Raymond D'Hollander, éditions AFT (2002) - ISBN 2-901264-53-0

La grande aventure de la cartographie par Beau Riffenburgh, éditions National Geographic (2011) - ISBN 2-845823-66-5

Histoire universelle de la navigation - tome 1 : les découvreurs d'étoiles par François Bellec, éditions De Monza (2016) - ISBN 2-916231-44-7

• e-bibliographie

Hipparchus par Liba Taub - <http://www.sites.hps.cam.ac.uk/starry/hipparchus.html>

Géographie par Strabon - <https://mediterranees.net/geographie/strabon/sommaire.html>

Christian Topography, Book 1 (Topographie Chrétienne, livre 1) par Cosmas

Indicopleustès - http://www.tertullian.org/fathers/cosmas_01_book1.htm

Codice 36 sur Cosmas Indicopleustès par Photius de Constantinople - <http://remacle.org/bloodwolf/erudits/photius/cosmas.htm>

Traité de la Sphère par Jean de Halifax - <http://www.sites.hps.cam.ac.uk/starry/sacroarmill.html>

Imago Mundi par Pierre d'Ailly - <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6572456q/f179>

ABSTRACT

The History of the Earth shape began in Europe 2500 years ago, with observations by Parmenides. Three calculations of its circumference were done during Ancient Times to lead on a too small evaluated sphere. Middle Ages preserved this knowledge and Age of Discovery corrected the ancient estimations. The elliptic shape of the Earth was established during the XVIIIth Century and the metre, created at the turn of the XIXth as the universal measure unit, was based on its circumference. Then continental drift was attested during the years 1930's. And finally deformations of the terrestrial ellipsoid were confirmed during the second half of the XXth Century.

Tadao Ando : l'art dans la vigne

■ Jean-Pierre MAILLARD

A 15 km au nord d'Aix-en-Provence Château La Coste est un domaine bien particulier. En même temps exploitation vinicole et centre d'art contemporain, la propriété est ouverte aux amateurs de vin et à ceux des Beaux-Arts, d'aucuns pouvant bien évidemment être les deux à la fois. On y a planté non seulement des vignes, mais aussi des sculptures et des constructions disséminées dans le paysage vallonné. Les architectes et artistes appelés à y intervenir ont tous une réputation internationale. Ils sont d'abord invités à visiter le site, s'imprégner de la beauté du coteau, le bien nommé La Coste. Puis, toute liberté leur est donnée dans le choix de l'emplacement et de l'œuvre à créer.

L'art contemporain au Château La Coste

La collection est impressionnante en premier par le nom des architectes qui ont signé le centre d'art, les chais de vinification, le pavillon de musique ou encore celui d'exposition, respectivement Tadao Ando, Jean Nouvel, Frank Gehry et Renzo Piano. Elle ne l'est pas moins avec les sculpteurs : Alexandre Calder, Louise Bourgeois, Richard Serra, Jean-Michel Othoniel et Hirochi Sugimoto¹. Elle l'est aussi par le nombre, *in situ*, de constructions, d'œuvres sculptées et d'installations, une bonne trentaine actuellement, ensemble le fait de vingt-sept créateurs.

Sur 200 hectares de terroir provençal s'étendant à perte de vue, le vignoble (sur 130 ha), les forêts de chêne et champs d'olivier incitent à la balade (celle-ci pouvant durer deux heures) : une randonnée nommée *La promenade Art & Architecture*. Le déplacement est plein de surprises et les réalisations Art et géométrie ne manquent pas. Par ailleurs, les férus d'œnologie pourront

¹ Voir XYZ n°129



Le centre d'art Château La Coste – une équerre signée Tadao Ando

distinguer les ceps de cabernet-sauvignon, de grenache, de sauvignon blanc, de syrah, de vermentino, de chardonnay ou encore de cinsaut et apprécier les cultures du domaine qui bénéficient du label "agriculture biologique" depuis 2009.

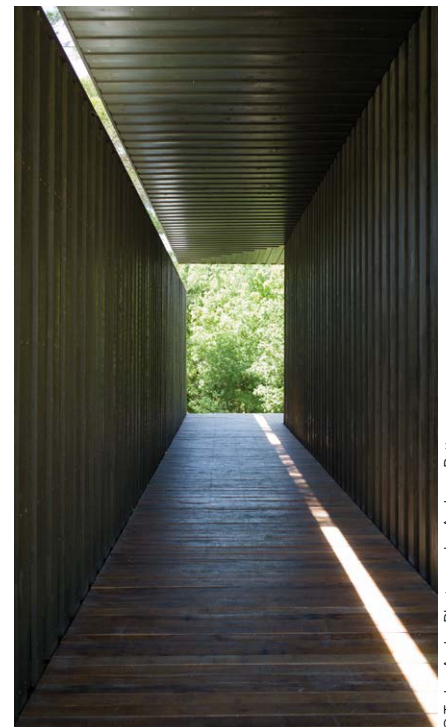
Avec cinq réalisations, Tadao Ando est le plus sollicité, Château La Coste lui ayant donné carte blanche pour s'exprimer, ce qui fait le profit de la France où il n'existe qu'une seule autre construction de sa conception, un petit pavillon au siège de l'UNESCO à Paris.

A mi-côte dans les arbres, derrière un buisson, on aperçoit un pavillon de bois à plan carré, à façade et pignons aveugles et avec un toit plat de Tadao Ando.

Pavillon "Four cubes to contemplate our environment" (quatre cubes pour contempler notre environnement)

Après repérage de l'unique entrée sur un côté, le visiteur tombe ensuite sur une enceinte intérieure perçue comme le point de départ d'un labyrinthe. Le mur oblige à suivre un couloir pour trouver, à l'opposé, une deuxième ouverture qui donne accès à la pièce centrale également à plan carré et sans

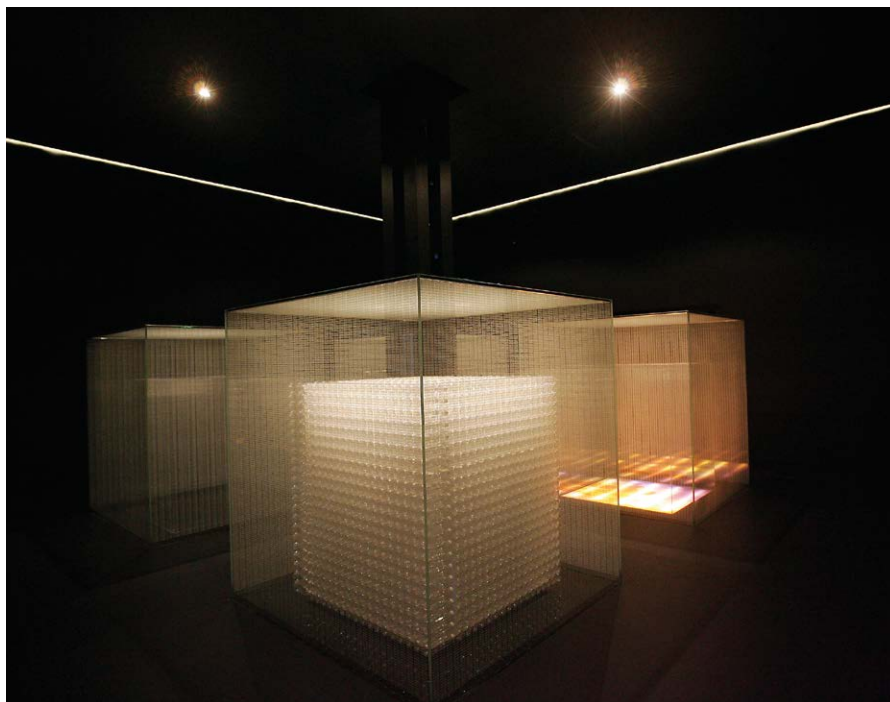
ouverture. Dans la pénombre éclairée par un discret néon, on découvre alors quatre cubes orthogonalement et régulièrement implantés, chacun enchâssé dans un écrin transparent un peu plus grand, de même forme. Le premier contient de l'eau, le deuxième une palette de bouteilles neuves en plastique de 50 cl, le troisième se présente comme des boîtes de CO₂ et le dernier montre un grand vide.



L'accès au couloir



© Tadao Ando. Photographie Andrew Pattman



Cubes to contemplate our environment

On pourrait avoir une lecture écologique de l'installation en comprenant l'illustration du passage de l'eau pure originelle à une production de plastique au devenir polluant, avec celle du gaz carbonique et son effet de serre qui ne conduisent qu'au néant du dernier cube, un appel à se ressaisir.

Tadao Ando au centre Pompidou-Paris

Vénéralisé par les Japonais comme un dieu vivant de l'architecture, Tadao Ando reste en France, on l'a vu, presque absent du paysage architectural. Avec la grande rétrospective "Tadao Ando, le défi", le centre Pompidou-Paris rend, jusqu'au 31 décembre 2018, hommage à l'œuvre gigantesque du créateur japonais. L'exposition donne une idée des occasions manquées en France, comme le projet de musée d'art contemporain sur l'île Seguin à Boulogne, sans suite, malgré la transformation en cours de la bourse de commerce à Paris, au service de la collection Pinault, bien remarquée (la mise en œuvre de l'idée de créer un autre univers à l'intérieur d'un édifice classé monument historique). Les projets de Tadao Ando sont à la fois humbles et d'une folle ambition : une église sur l'eau, le musée d'art moderne de Fort Worth, la Fondation

Pulitzer pour les arts, une forêt de la mer au cœur de la baie de Tokyo ou l'île de Naoshima, totalement consacrée à l'art contemporain. Frédéric Migayrou explique : "Tadao Ando est un architecte qui invente sa propre architecture, son propre langage, Comme il est autodidacte, il n'est pas sous dépendance d'un maître, d'un professeur ou d'une école. Il va être très influencé par Le Corbusier, mais il va réinventer le langage du Corbusier dans une relation à la tradition japonaise, au shintoïsme."

Tadao Ando exprime des positions très affirmées en déclarant : "Il faut que l'architecture accueille la joie de vivre des hommes", "l'architecture est toujours à la limite entre ce qui attire et ce qui repousse", "l'architecture doit être un lieu communautaire", "si le bâtiment ne communique rien, ça n'est pas de l'architecture". Il a bien conscience que les constructions ne sont pas éternelles mais il tient à ce que l'âme de celui qui a fondé leur naissance perdure, dans une quête d'éternité.

Tadao Ando

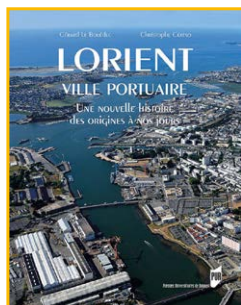
Né en 1941, Tadao Ando est l'un des architectes contemporains les plus reconnus au monde. Après avoir débuté comme boxeur, il se tourne vers l'architecture deux ans après

être sorti diplômé de ses études secondaires. Il a profité de l'ouverture donnée aux Japonais, cloîtrés dans leur pays jusque dans les années 1960, pour parcourir le monde et connaître en particulier l'œuvre de Le Corbusier. Il est le seul architecte à avoir remporté les quatre distinctions les plus prestigieuses de sa discipline, à savoir les prix Pritzker, Carlsberg, Premium Imperiale et Kyoto. Ando travaille actuellement dans sa ville natale d'Osaka.

Combinant influences japonaises traditionnelles et principes du design moderniste, Ando a développé un langage unique du bâtiment qui utilise le béton, le bois, l'eau, la lumière et l'espace en harmonie avec la nature. Ses créations comptent des résidences privées, des bureaux, des églises, des musées, des immeubles d'appartements et des espaces culturels dans tout le Japon, mais aussi en France, en Italie, en Espagne et aux États-Unis. Parmi ses œuvres les plus célèbres, citons l'Église de la Lumière à Osaka, le Temple de l'Eau sur l'île de Awaji, la maison Azuma, le Musée d'Art contemporain de Naoshima et la Punta della Dogana à Venise.

Les œuvres de Tadao Ando sont connues pour leur recours créatif à la lumière naturelle et leurs structures qui s'inspirent des formes naturelles de l'environnement plutôt que de se conformer à l'espace construit d'un bâtiment. Les constructions d'Ando se caractérisent souvent par des puits de lumière des parcours de circulation tridimensionnels complexes qui sinuent entre espaces intérieur et extérieur. Composé à la fois à l'intérieur de vastes formes géométriques et dans les espaces qui les séparent, ces chemins fonctionnent comme autant de voies vers la contemplation.

Jusqu'à la fin de l'année, les Parisiens, les Franciliens et autres, passant à Paris, peuvent faire mieux connaissance avec Tadao Ando en visitant l'exposition du centre Pompidou, en attendant, pourquoi pas, de programmer une belle marche vinicole et culturelle en Provence, au Puy-Sainte-Réparate dans les Bouches-du-Rhône. ●



■ Grand prix de l'académie de marine - Lorient, ville portuaire Une nouvelle histoire des origines à nos jours

Gérard LE BOUËDEC et Christophe CÉRINO

Depuis 350 ans, l'avenir de Lorient s'est toujours joué autour de ses ports. Ville deux fois nouvelle à trois siècles d'intervalle, Lorient s'est bâtie, développée, puis a été reconstruite par l'économie maritime. Ce livre se donne pour objet d'offrir une interprétation de cette trajectoire originale, de 1666 à 2016, à travers celle du développement portuaire qui permet de suivre les mutations économiques et sociales, le jeu des acteurs et les transformations de la cité.

Au XVIII^e siècle, le premier modèle fut celui du commerce colonial et d'un port qui connut, dès sa fondation, un horizon mondial avec la Compagnie des Indes. Le second fut celui de la construction navale à l'heure de la révolution industrielle et de la grande mutation des flottes de guerre, passant peu à peu, au XIX^e siècle, des vaisseaux de ligne en bois aux cuirassés. Au début du XX^e siècle, ce modèle se complète et pousse sa diversification par le commerce du charbon et les débuts du chalutage à vapeur avec la création du port de pêche industriel de Keroman qui devient très vite le second de France, et le développement du port de commerce du côté de l'anse de Kergroise. Les années 1940 marquent la fin d'un premier cycle d'urbanisation. Devenue un objectif stratégique de premier ordre avec la construction de la principale base de sous-marins du Reich, Lorient est totalement dévastée par les bombardements de 1943. En 1945 s'ouvre une période de refondation qui va durer près de cinq décennies. C'est une nouvelle fois par les activités maritimes que Lorient renaît de ses cendres, en s'appuyant sur le port militaire et l'arsenal ; ce port de pêche de Keroman, quant à lui, connaît une pleine prospérité, et celui de Kergroise poursuit son développement. Dans le courant des années 1990, le lancement des restructurations de la Défense marque de façon irréversible la fin du modèle hérité des fondements Colbertistes de la cité. S'ouvre alors le temps

des mutations structurelles. Après avoir réussi dans un temps record la reconversion en pôle nautique de son ancienne base de sous-marins, la décennie 2010 ouvre Lorient vers de nouveaux horizons maritimes et urbains. Cet important ouvrage comporte 289 figures et photos, et 46 tableaux.

Gérard Le Bouëdec, après avoir été directeur de l'UFR Langues-Lettres et sciences humaines, vice-président recherche chargé des Sciences humaines et sociales, directeur de l'unité de recherche en histoire maritime (CERHIO) fondateur et directeur du Groupement scientifique d'Histoire maritime-CNRS.

Christophe Cérimo est ingénieur de recherche en histoire maritime (UMR CERHIO-CNRS) et enseignant à l'université de Bretagne-Sud. Il est président fondateur du Musée sous-marin du Pays de Lorient, premier espace muséographique créé au sein de l'ancienne base de Keroman.

► Presses universitaires de Rennes
Ouvrage publié avec le soutien de la Région Bretagne et de la ville de Lorient
39 € - 398 pages - ISBN : 978-2-7535-5689-8

■ Manuel du télépilote de Drone - Préparation à l'examen du télépilote drone

Régis LE MAITRE et Bastien MANCINI

Le "savoir" prépare au "savoir-faire" et c'est dans le premier nommé que s'inscrit ce manuel. L'objectif est de présenter les connaissances théoriques nécessaires au télépilote dans le cadre de sa formation initiale et du maintien de ses compétences. Cela concerne aussi bien la description et le fonctionnement des composants du drone que les principes de son vol, l'environnement météorologique dans lequel il évolue, le cadre réglementaire général et spécifique qui le concerne, les principes de la navigation, la conduite de la mission en scénario opérationnel et les connaissances fondamentales sur les performances humaines.

Ce socle de connaissances, volontairement large, est présenté dans les phases suivantes : 1 - Connaissance des aéronefs. 2 - Principes du vol. 3 - Météorologie. 4 - Réglementation. 5 - Navigation. 6 - Procédures opérationnelles. 7 - Performances humaines. 8 - Préparation et suivi du vol.

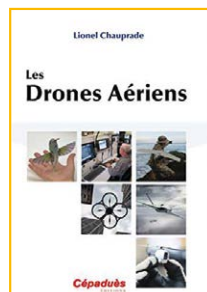
Un index vous permet de naviguer plus facilement dans le manuel et de retrouver, au fil de votre progression, les réponses aux questions théoriques que vous vous posez.

Régis Le Maitre est ingénieur et enseignant à l'ENAC, et contributeur des manuels du pilote.



Bastien Mancini, cofondateur de DELAIR, constructeur français de drones, est compétent spécifique en drone aérien. L'ouvrage est préfacé par **Farid Zizi**, ancien président de la commission navigation aérienne de l'OACI.

► Cépaduès Éditions
40 € - 206 pages - ISBN : 9 782364 936515

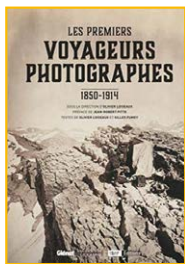


■ Les drones aériens Lionel CHAUPRADE

En réalisant une photographie globale du monde des drones, secteur industriel en constante évolution, cet ouvrage établit un point de situation sur le sujet et tente en particulier de définir la plus-value réelle de ces machines, ainsi que leur complémentarité par rapport aux aéronefs habités. En prenant en compte aussi bien les contraintes techniques et économiques que réglementaires, il met en évidence ce qui relève de la réalité, du fantasme ou de la pure communication.

Cet ouvrage s'adresse autant au spécialiste pétri de culture aéronautique qu'au lecteur profane. Son lexique des acronymes français et anglo-saxons offre les clefs de terminologie permettant éventuellement d'approfondir certaines recherches sur la toile. Enfin, tout en racontant l'origine et la filiation de ces systèmes automatisés, l'ouvrage "le monde des drones aériens" explique leur classification, et leurs caractéristiques établies en fonction de leurs niveaux d'emploi et des missions dédiées. Il ouvre une fenêtre à la fois sur les applications civiles, et sur les programmes futurs qui vont de la plus petite échelle jusqu'au domaine spatial et maritime.

► Cépaduès Éditions
24 € - 150 pages - ISBN : 978.2.36493.099.5



■ Les premiers voyageurs photographes - 1850 - 1914
Sous la direction d'Olivier LOISEAUX, préface de Jean-Robert PITTE
Textes d'Olivier LOISEAUX et Gilles FUMEY

Cet ouvrage présente des clichés pris sur le vif par des explorateurs photographes épris de découverte entre 1850 et 1914. De l'Orient à l'Occident, il constitue une invitation au voyage en même temps qu'une histoire des débuts de la photographie. Officiers, reporters ou savants, en mission ou en quête d'aventure, amateurs ou professionnels, les premiers voyageurs photographes ont su, dès les années 1850, faire preuve d'une grande maîtrise technique, dans des conditions souvent extrêmes. Véritable incitation au voyage, cet ouvrage nous invite sur les pas de ces infatigables explorateurs que sont Charnay, Du Camp, Bourne, O'Sullivan ou Tripe, à la découverte de civilisations et de contrées alors inconnues. Paysages grandioses de l'Ouest américain, temples mythiques d'Angkor ou de Palmyre, construction du canal de Panama, scènes de vie quotidienne telle la pêche aux cormorans en Chine : le voyageur-photographe collecte, enregistre et répertorie l'information. Face à un monde en pleine mutation, il répond à la soif de connaissances de ses contemporains et au besoin de conserver la trace de mondes en péril ou émergents. Rassemblés au sein des collections de la Société de géographie, ici mises en lumière, ces impressionnants clichés aux techniques variées – tirages albuminés, négatifs sur verre, positifs de projection, cyanotypes – témoignent du talent de ces pionniers, nous offrant ainsi, en un tour du monde, une histoire des débuts de la photographie.

Olivier Loiseaux est conservateur en chef au département des Cartes et plans de la bibliothèque nationale de France, où il est en charge des collections de la Société de géographie.

Gilles Fumey est professeur des universités, docteur en géographie et chercheur au CNRS. Spécialiste de la géographie culturelle, il est membre de la Société de géographie et président pour le développement du Festival international de géographie de Saint-Dié-des-Vosges.

Jean-Robert Pitte, géographe, ancien président de l'université de Paris-Sorbonne, est président de la Société de géographie et secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences morales et politiques.

► Coéditions Glénat - La Société de Géographie - La Société des Explorateurs - BnF Éditions
 35 € - 240 PAGES - ISBN : 9 782344 027738

■ Manuel pratique du métreur "Loi Carrez" 3^e édition
Ouvrage collectif sous la direction de Patrice LEMAÎTRE

Ce manuel conçu en 1998, édité pour la première fois en 2005, puis une seconde fois en 2012, est pour l'association professionnelle des métreurs un support interne de formation technique. Il est également un outil de présentation du professionnalisme des métreurs, vérificateurs et économistes en construction, auprès de tous les donneurs d'ordres qu'ils soient propriétaires, copropriétaires, maîtres d'ouvrages privés ou publics, gestionnaires de patrimoines immobiliers, facilities managers, mais aussi les concepteurs et les constructeurs. Cet ouvrage didactique permet de découvrir le métreur sous un nouvel angle, et ainsi de percevoir le potentiel "économique" de cette profession bien souvent méconnue et pourtant créée historiquement dans le cadre de la protection des consommateurs.

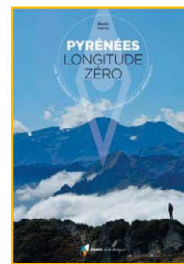
Le métreur était autrefois appelé toiseur et la nomenclature des ouvriers en bâtiment le définissait de la manière suivante¹ : "Un douzième ouvrier, employé par le maître maçon et qui n'est appelé que lorsque le bâtiment est fini, est le toiseur. Son emploi, et souvent son seul talent, est de savoir toiser toutes les parties du bâtiment suivant les usages et la loi, d'en dresser les mémoires et d'y mettre des prix relatifs aux marchés et à l'espèce d'ouvrage".

Patrice Lemaître est métreur-vérificateur conseil MRICS et économiste de la construction OPQTECC-UNTEC.

¹ BANDY de NALECHE (Louis) : Les maçons de la Creuse - E. DENTU - (Paris, Éditions René Des-sagne, 1859)

► "La Guilde des économistes en construction"
 15, avenue Thérèse - 94420 LE PLESSIS-TREVISE
 Téléphone : 01.45.93.36.06 - 25 € - 78 pages

■ A lire dans la revue COLS BLEUS n° 3070, l'article intitulé "Demain les drones marins", sur le programme "Système de lutte anti-mines futur" dit SLAMF, qui remplacera les 19 navires actuellement dédiés à la lutte contre les mines.



■ Pyrénées longitude zéro
Une traversée inédite le long du méridien de Greenwich
 Bruno Valcke

Cet ouvrage présente une idée de traversée des Pyrénées, partagée par l'auteur et développée pour évoquer la diversité paysagère et naturaliste des deux versants de la chaîne. L'itinéraire suivi par l'auteur est informatif (textes et trace GPS).

Après de nombreux repérages sur le terrain, cet itinéraire a vu le jour : 176,5 km pour 10 400 m de dénivelé, présentés en neuf sections de Lourdes, dans les Hautes-Pyrénées, à Alquézar, en sierra de Guara (Aragon), deux cités riches d'un formidable patrimoine. Tout randonneur peut envisager de le parcourir étape par étape, en sélectionnant des tronçons, en intégralité, ou encore en l'adaptant à ses aspirations, et en ayant une bonne expérience de la marche itinérante en haute montagne.

La trace GPS de l'intégralité du parcours est téléchargeable à l'adresse <http://www.glenalivres.com/gpx/PyreneesLongitudeZero/>

PyreneesLongitudeZero.gpx. L'auteur, qui est accompagnateur en montagne dans les Hautes-Pyrénées, collabore à la rédaction des cartes de randonnée et est auteur de plusieurs guides de Rando éditions (Rando-étapes, collection Belvédères, collection Sentiers d'Émilie, Guide Rando, collection Rando Pratique...).

Les nombreuses photographies de cet ouvrage sont de Bruno Valcke.

► GLÉNAT ÉDITIONS - RANDO ÉDITIONS
 25 € - 168 PAGES
 ISBN : 9782344025451

RÉPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 157	
COVADIS GEOMEDIA	4° de couv.
GEOTOPO	2° de couv.
Forum de l'AFT	3° de couv.
LEICA GEOSYSTEMS	2
REIS STOLZEL	44

Décentralisation de la gestion foncière : état des lieux et défis au Burundi

■ Claire GALPIN

Depuis une dizaine d'années, GSF a soutenu les acteurs du secteur foncier au Burundi, pays qui s'est engagé dans un processus de décentralisation de la gestion foncière depuis les années 2000. Expérimentée dans les projets financés par les partenaires techniques et financiers (PTF), la certification foncière trouve son fondement légal dans la Loi N°1/13 du 9 août 2011 portant révision du code foncier du Burundi. La loi offre la possibilité d'établir un certificat foncier sur les droits unanimement reconnus au niveau de la communauté, selon les usages actuels du lieu.

La décentralisation de la gestion foncière consiste à mettre en place des services en charge de la certification des droits fonciers souvent au niveau des communes. C'est souvent une réponse à l'inaccessibilité géographique, financière et procédurale du service de sécurisation foncière offerte par les services officiels en charge du foncier. Ainsi, les services fonciers communaux ont vocation à être des dispositifs de proximité en charge de la certification des droits sur base de leur reconnaissance publique, participative et contradictoire au niveau communautaire. Actuellement, des services fonciers existent dans 69 des 119 communes du Burundi.

Si dès les années 2010, les PTF ont appuyé la création d'une cinquantaine de services fonciers communaux en assurant la totalité des frais d'implantation et de fonctionnement, le cofinancement est rapidement devenu la norme, afin de pérenniser l'expérience avec comme objectif final, la reprise progressive et totale du financement du service par les communes. La moitié des communes ont rempli l'objectif à ce jour. On observe depuis 2016 que certaines communes ont emboîté le pas aux premières initia-

tives en créant des services avec leurs propres moyens ou sur appui partiel de l'État à travers le Secrétariat permanent de la Commission Foncière Nationale qui dispose d'un petit fonds d'appui aux services fonciers communaux (SFC).

Les SFC au Burundi fonctionnent suivant une procédure simplifiée, dont le coût est accessible à la population rurale. Les communes optent pour des techniques de levé simples, non subordonnées à la haute technologie, que les agents recrutés au niveau communal sont en mesure de maîtriser avec un renforcement de capacités spécifique. C'est ceci qui fait de ces services des dispositifs *low cost* de proximité. Les SFC ont permis à la population rurale d'accéder à la sécurisation de leurs droits fonciers contrairement aux titres fonciers (certificat d'enregistrement délivré par le service en charge de la conservation de la propriété foncière de cette ancienne colonie belge) qui leur étaient totalement inaccessibles. La demande en certificat foncier des usagers est souvent supérieure aux capacités des services à y faire face. On comprend aisément que leur implantation est venue répondre à un besoin réel de la population.

Par ailleurs la validation communautaire, publique et contradictoire des droits revendiqués, est un pas important vers une gestion foncière basée sur les réalités locales. Cette méthodologie permet la médiation des conflits qui peuvent se manifester pendant l'enquête foncière par les membres de la commission de reconnaissance collinaire. Il apparaît que 70 % des conflits qui se manifestent sont résolus par médiation.

Il est rassurant de constater que malgré l'arrêt de l'appui des PTF, une majorité de SFC continuent de fonctionner. Les agents fonciers ont été intégrés dans le staff communal et les lignes de dépenses et de recettes sont prises en compte dans l'établissement du budget annuel des communes. Pour maintenir le cap,



presque toutes les communes réaménagent les tarifs de certification, pour compenser, au moins partiellement, le déficit dû au retrait des bailleurs. L'autre stratégie a été l'adaptation des salaires des agents fonciers aux barèmes appliqués pour le personnel communal, étant entendu que les agents fonciers bénéficiaient d'autres avantages pendant l'appui du partenaire externe. Il est même des communes qui font preuve de beaucoup de dynamisme, cela est le mérite de l'implication des administrateurs communaux (maires) qui sont conscients de l'importance de la sécurisation foncière.

Un important défi à relever concerne l'enregistrement des mutations opérées sur des droits fonciers certifiés au niveau du service foncier communal. D'après les enquêtes effectuées, une infime partie de ces opérations est portée au niveau des SFC. Le défaut de mise à jour des mutations risque, à court ou à long terme, de déboucher sur des problèmes de conflits fonciers que la certification foncière est censée prévenir.

La place de la femme dans le processus de sécurisation foncière est un autre défi d'importance. En effet, les études ont montré que les femmes n'accèdent pas facilement à la terre du fait de la coutume, sachant que l'héritage est le principal mode d'accession aux droits fonciers au Burundi. Un premier pas est fait par certains SFC qui ont pris la décision de sécuriser systématiquement les droits reconnus communautairement aux femmes, notamment le droit d'usufruit. Un long chemin reste encore à parcourir. ●



FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2019

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

le 15^e Forum de la topographie

le jeudi 28 mars 2019 de 9 h 00 à 17 h 30
29 rue des Jardiniers 54000 Nancy
sur le thème

L'immersion numérique en topographie



RÉSERVEZ MAINTENANT VOTRE JOURNÉE EN VOUS INSCRIVANT EN LIGNE PAR INTERNET
<https://www.billetweb.fr/forum-aft>

1. Participation au Forum avec repas : 10 € (La participation au forum est gratuite, le coût couvre le repas servi au lycée).
2. Participation au Forum sans repas : gratuit (La participation au forum est gratuite et ne comprend pas la restauration).
3. Exposants, invités et encadrement AFT : gratuit (Comprend le repas gratuit, veuillez demander le lien confidentiel).

Tous les paiements seront effectués par Internet et carte bancaire.

En vous adressant à forum@aftopo.org ou au secrétariat de l'AFT et en présentant vos prénom, nom, adresse courriel et entreprise vous pourrez obtenir une inscription pour les tarifs 2.- sans repas et 3.- si vous êtes éligibles.

Association française de topographie

73, avenue de Paris - 94165 SAINT-MANDÉ Cedex – Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

Participants : forum@aftopo.org – Exposants : communication@aftopo.org



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